

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO***



SIMULACIÓN DE LOS EPISODIOS DE AVENIDA EN EL RÍO ARGA A SU PASO POR PAMPLONA MEDIANTE HEC-HMS

presentado por

MIGUEL ÁNGEL GONZÁLEZ MORENO *k*

aurkeztua

**INGENIERO AGRÓNOMO
*NEKAZARITZA INGENIARITZA***

Febrero 2011

D. **José Javier López Rodríguez**, profesor titular del Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural de la Universidad Pública de Navarra,

CERTIFICA

Que el Trabajo Final de Carrera titulado “*Simulación de los episodios de avenida en el río Arga a su paso por Pamplona mediante HEC-HMS*” que presenta el alumno, **Miguel Ángel González Moreno**, ha sido realizado en el Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural de la Universidad Pública de Navarra, bajo su dirección,

Y AUTORIZA su presentación al objeto de optar al título de Ingeniero Agrónomo.

En Pamplona, a 4 de febrero de 2011.

Fdo.: El alumno,
D. Miguel Ángel González Moreno.

Fdo.: El profesor,
D. José Javier López Rodríguez.

ÍNDICE

Resumen.	7
1. Introducción y objetivos.	9
1.1 Introducción.	9
1.2 Antecedentes.	10
1.2.1 Protocolo del Ayuntamiento de Pamplona.	10
1.3 Objetivos.	12
2. Descripción de la cuenca.	13
2.1 Localización y situación.	13
2.2 Descripción física de la cuenca	15
2.2.1 El río principal: El Río Arga	15
2.2.2 Afluentes principales.	16
- El río Ulzama.	16
- El río Elorz.	16
2.2.3. Afluentes secundarios.	16
- El río Sadar.	16
- El río Egüés.	16
2.2.4. Las masas de agua.	17
- Embalse de Eugui.	17
- Balsa de Ezkoriz.	18
- El embalse de Monreal.	20
- Otras balsas y embalses.	21
2.2.5. La vegetación.	22
2.2.6. La geología.	23
2.3 Las estaciones de medida.	24
2.3.1. Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA).	25
2.3.2. Estaciones Meteorológicas Manuales (EMM).	26
2.3.3. Estaciones de Aforo (EA).	27

3. Descripción del modelo hidrológico.	31
3.1. El modelo hidrológico HEC-HMS.	31
3.2. División en subcuencas.	32
3.3. Determinación de la lluvia areal: Polígonos de Thiessen.	34
3.4. Determinación de la lluvia efectiva: El número de curva.	36
3.5. Circulación de la lluvia efectiva a través de la cuenca: Método del H.U.	37
3.6. Circulación los hidrogramas a lo largo de los cauces: Muskingum.	40
4. Aplicación del modelo.	43
4.1 Introducción.	43
4.1.1. Los eventos seleccionados.	43
4.2 Análisis de la correspondencia entre datos.	45
4.3 Determinación del H.E.D.: Separación del flujo base.	45
4.4 Análisis de la distribución espacial de las precipitaciones.	47
4.5 La lluvia equivalente.	49
4.6 Análisis de sensibilidad.	51
4.7 Aplicación y análisis del modelo.	55
5. Resultados.	57
5.1 Resultados <i>Con sólo EMAs</i> versus <i>Con todas las EM.</i>	57
5.2 Resultados <i>Con Eugui</i> versus <i>Sin Eugui.</i>	59
5.3 Resultados definitivos.	60
6. Conclusiones.	63
7. Referencias.	65
8. Agradecimientos.	69

ANEXO I. Tratamiento de la información territorial.

I.1. Herramientas utilizadas.	3
I.1.1 HEC-HMS 3.5	3
I.1.2 ArcView GIS 3.2a	4
I.1.3 HEC-GeoHMS 1.1	4
I.2. Cortar los mapas.	5
I.3. Terrain Preprocessing.	5
I.4. Hydrologic Model Setup.	7
I.5. División en subcuencas.	7
I.6. Mapa del CN.	8
I.6.1 Tipo hidrológico del suelo.	8
I.6.2 Uso del suelo.	11
I.6.3 Condición superficial del suelo.	14
I.6.4 Condición de humedad antecedente.	14
I.6.5 Creación mapa del CN.	15
I.7. Basin Characteristics.	17
I.8. Hydrologic parameters.	18
I.9. Pasar al HMS.	19
I.10 Determinación de la lluvia areal: Polígonos de Thiessen.	21

ANEXO II. Descripción del HEC-HMS 3.5.

II.1. Basin models.	5
II.1.1. Junction.	6
II.1.1.1 Balsa de Ezkoriz.	6
II.1.2. Subbasin.	7
II.1.2.1 Loss Method.	7
II.1.2.2 Transform method.	8
II.1.2.3 Parámetros subcuencas.	11
II.1.3. Reach.	11
II.1.3.1 Routing Method.	12
II.1.3.2 Parámetros de los ríos.	14
II.1.4. Source.	15
II.1.4.1 Embalse de Eugui.	16
II.2. Metereologic models.	16
II.2.1. Precipitation models.	16
II.3. Time-series data.	18
II.3.1. Precipitation gages.	18
II.3.2. Discharge gages.	19
II.4. Control specifications.	20
II.5. Ejecución y resultados en el modelo.	21
II.5.1. Simulation Run.	21
II.5.2. Visualización de los resultados.	22
II.5.2.1 Global Summary Results.	22
II.5.2.2 Hidrograma de caudal.	22

ANEXO III. Separación del flujo base.

III.1. Introducción.	3
III.2. El método de Eckhardt.	3
III.3. Los flujos bases de cada evento.	5
- Evento de 2006.	6
- Evento de 2007.	7
- Evento de enero 2009.	8
- Evento de febrero 2009.	9
- Evento de 2010.	10

ANEXO IV. Análisis de la distribución espacial de las precipitaciones.

IV.1. Elección de los parámetros para la representación gráfica.	3
IV.2. Caracterización de algunos los eventos más significativos.	7
IV.3. Representación de los eventos seleccionados.	12
- Avenida de marzo 2006.	12
- Avenida de abril 2007.	14
- Avenida de enero 2009.	16
- Avenida de febrero 2009.	18
- Avenida de enero 2010.	20
- Tablas de la Condición de Humedad Antecedente.	22

ANEXO V. Resultados.

V.1 Introducción.	3
V.1 Resultados <i>Con Eugui</i> versus <i>Sin Eugui</i> .	5
- Evento de 2006.	5
- Evento de 2007.	6
- Evento de enero 2009.	7
- Evento de febrero 2009.	8
- Evento de 2010.	9
V.2 Resultados definitivos.	10
- Evento de 2006.	10
- Evento de 2007.	12
- Evento de enero 2009.	14
- Evento de febrero 2009.	16
- Evento de 2010.	18

RESUMEN

En el río Arga y sus afluentes se dan periódicamente crecidas y desbordamientos que causan daños a la agricultura, infraestructuras y núcleos de población. Es importante estudiar las causas, los efectos y la periodicidad de estos eventos para así desarrollar herramientas que profundicen en la predicción de éstos y permitan prevenir los daños que provocan.

Para ello se seleccionarán previamente una serie de eventos significativos de los últimos años con consecuencias de inundación y daños diversos en la capital navarra o localidades próximas, de estos se tomarán aquellos episodios de los que se disponga suficiente información (pluviométrica y de aforo).

Una vez seleccionado aquellos eventos más significativos, y con el fin de predecir, prevenir y, por lo tanto, minorar los efectos de dichas inundaciones es importante contar con herramientas de simulación hidrológica e hidráulica suficientemente evaluadas como es el modelo *Hidrologic Modeling System* (HMS), software desarrollado en el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), acotando la cuenca del río Arga desde su origen hasta la localidad de Arazuri (Navarra).

Con estos eventos se procederá a la evaluación del modelo que consistirá en una aplicación y un análisis de sensibilidad del mismo, realizándose finalmente, unas conclusiones.

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1. Introducción.

El río Arga, junto a sus afluentes, ha sido fuente de asentamientos a lo largo de la historia, convirtiendo a Pamplona y su comarca en el núcleo de población principal de Navarra. En las últimas décadas, la reducida superficie del término municipal de Pamplona así como de los pueblos del contorno, y la escasez de espacios libres en los mismos, ha hecho que los diferentes desarrollos urbanísticos hayan ejercido una cierta presión sobre estas áreas pertenecientes al cauce principal de los ríos.

Por dichos motivos y con cierta frecuencia, se producen avenidas que causan inundaciones en zonas urbanizadas residenciales con los consiguientes daños en las infraestructuras, viviendas, mobiliario, etc.



Figura 1.- Avenida de febrero de 2009.

Se puede definir inundación como la cobertura temporal de la tierra por el agua como resultado del incremento del nivel del agua que escapa de sus límites habituales. Este incremento del nivel del agua es el resultado de precipitaciones fuertes o continuas que exceden la capacidad de absorción del suelo, así como de ríos, corrientes o zonas costeras.

Las crecidas y las inundaciones son unos fenómenos naturales y recurrentes de los ríos, ramblas y barrancos, y que desempeñan un papel en el funcionamiento del ecosistema (*Libro Blanco del Agua* – MMA, 2000). Por una parte son un medio básico de transporte de sedimentos, de modelación geomorfológico, y por lo tanto, de renovación del sustrato físico del ecosistema.

Por otra parte, las crecidas controlan la demografía de especies superiores, tanto vegetales como animal, del ecosistema fluvial. Sin embargo, estas crecidas pueden provocar inundaciones graves, con resultado de pérdidas económicas en mayor o menor medida y el desplazamiento temporal de personas, e incluso, en el peor de los casos, la pérdida de vidas humanas.

Ante esta situación y como paso previo a la simulación hidráulica que permita simular los niveles de la lámina de agua en las secciones transversales del río y, por lo tanto, las zonas inundables, es importante contar con un modelo hidrológico que permita determinar los caudales que circulan por los distintos ríos que atraviesan el núcleo urbano, a partir de los datos de los distintos pluviómetros que se encuentran en la cuenca o próxima a la misma. Con esta finalidad se ha analizado el modelo HEC-HMS para avenidas de cierta importancia de las que se disponen datos de caudal y de lluvia.

El modelo hidrológico HEC-HMS, desarrollado en el *Hydrologic Engineering Center*, es un modelo lluvia-escorrentía ampliamente utilizado desde hace tiempo para la simulación de avenidas. El modelo se basa en estructurar la cuenca origen en subcuencas asociadas a los cauces de la red fluvial. En cada subcuenca se genera el hidrograma de escorrentía directa y dichos hidrogramas se hacen circular por la red de cauces. Dichos hidrogramas se van sumando en los distintos puntos de confluencia. HEC-HMS dispone de muchos métodos tanto para simular el hidrograma de escorrentía directa como para circular los hidrogramas por los cauces, en este caso se ha seleccionado para la calibración los siguientes parámetros: El método del *Hidrograma Unitario del SCS* para el primero, y el de *Muskingum* para el segundo. Los yetogramas de precipitación efectiva para cada subcuenca se han determinado, a partir de los registrados en las estaciones pluviométricas, mediante polígonos de *Thiessen*, y aplicando el método del *Número de Curva del SCS*.

1.2. Antecedentes.

Con anterioridad a este trabajo, se han realizado en los últimos años diversos estudios hidráulicos sobre el río Arga, entre los que destacan fundamentalmente los dos que se citan a continuación:

- “*Estudio hidráulico del río Arga en la Comarca de Pamplona*”
(1998, Ayuntamiento de Pamplona)
- “*Delimitación de zonas inundables y ordenación hidráulica de los ríos de las cuencas del Arga y del Cidacos*”
(2000, Gobierno de Navarra)

En dichos estudios, se obtuvo la modelización de caudales por diferentes tiempos de retorno, profundizando los conocimientos sobre la peligrosidad de sus avenidas. Estos estudios permitieron determinar el periodo de retorno de 25 años (Caudal de 450 metros cúbicos por segundo en la localidad de Arazuri, que es el punto de salida de este estudio) como aquél que provoca daños significativos, hecho claramente suportado por parte de diferentes avenidas producidas a lo largo de los años.

1.2.1 Protocolo del Ayuntamiento de Pamplona.

El Ayuntamiento de Pamplona ha establecido recientemente (Enero 2010) un protocolo de acción preventiva ante posibles eventos de avenida basado en función del caudal medido en lugares estratégicos, adaptándose a las líneas generales del “*Plan especial de emergencias ante el riesgo de inundaciones de la Comunidad Foral*” aprobado por el Gobierno de Navarra en el año 2002.

El plan consta de cinco documentos:

1. El marco legal (Plan especial de Protección Civil ante inundaciones en Navarra, estudio de delimitación de zonas inundables, y documentación gráfica y escrita de las últimas inundaciones).
2. Análisis de riesgo (Tormentas de verano y lluvias intensas entre octubre y marzo, y subdivisión del cauce del Arga en tres tramos).

La división del río Arga en esos tres tramos, se ha realizado coincidiendo con los puentes existentes en la ciudad:

- El primero desde el puente de Burlada al puente del Vergel.
 - El segundo del puente del Vergel al puente de San Jorge.
 - Y el tercero desde el puente de San Jorge al fin del término municipal en el Polígono Industrial de Landaben.
3. Estructura del plan (Grupo de orden y trabajo, grupo de intervención y grupo asistencial).
 4. Operatividad del plan (Fases de alerta y emergencia).

Se han fijado tres niveles contemplados en el plan: Normalidad, Alerta y Emergencia. A su vez, se ha dividido la fase de Emergencia en tres fases, 0, 1 y 2. Todo ello para cada uno de los ríos/tramos contemplados.

5. Fichas de respuesta.

Además, se ha incluido una serie de recomendaciones genéricas para la ciudadanía.

Los niveles de alerta del plan

Estas son los tres niveles del “Plan de Actuación ante el Riesgo de Inundaciones” con sus correspondientes fases.

❖ **Fase de normalidad.**

❖ **Fase de alerta:**

• **Alerta Arga:**

El caudal del río Arga, más caudal del río Ulzama, supera más de 150 m³/por segundo.

• **Alerta Elorz:**

La altura del río Elorz supera los 1,3 metros de altura en la estación de aforo, situada en el barrio pamplonés de Echavacoiz.

❖ **Fase emergencia:**

• **Arga - Emergencia 0:**

El caudal del río Arga, más caudal del río Ulzama, supera más de 175 m³/por segundo.
(Equivalente a la avenida enero de 2009)

• **Arga - Emergencia 1:**

El caudal del río Arga, más caudal del río Ulzama, supera más de 330 m³/por segundo.
(Equivalente a la avenida febrero de 2009)

• **Arga - Emergencia 2:**

El plan del embalse de Eugui (Escenario dos del plan de la presa).

• **Elorz - Emergencia 0:**

La altura del río Elorz supera los 2 metros de altura.

1.3. Objetivos.

Los **objetivos** del presente Trabajo Final de Carrera son el caracterizar las lluvias que provocan los episodios de inundación, poner a punto el modelo HEC-HMS para aplicarlo con la finalidad de simular los hidrogramas de avenida en la ciudad de Pamplona y su área metropolitana, y realizar una serie de comparaciones con dicho modelo en función de los parámetros seleccionados.

Para ello, se disponen de los registros de precipitación diezminutales, en las estaciones meteorológicas automáticas, o diarios, en las estaciones meteorológicas manuales, repartidas por toda la superficie de la cuenca y próxima a la misma. También se disponen de los registros diezminutales de caudal de las estaciones de aforo ubicadas en distintos puntos de la red fluvial de la cuenca del Arga hasta Arazuri.

Con todo ello, se selecciona uno o varios de esos eventos más importantes de los últimos años, y una vez estimados los parámetros del modelo HEC-HMS para la cuenca, se aplican para dichos eventos.

En vista de los diferentes resultados que se pueden obtener en función de los diversos parámetros que influyen en el modelo, se realiza un análisis de sensibilidad detallado de aquellos parámetros más representativos de los distintos procesos simulados.

En base a este análisis se evalúa el modelo, y se realizan las conclusiones pertinentes teniendo siempre como referencia la estación de aforo de Arazuri.

2. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

2.1. Localización y situación.

La Comunidad Foral de Navarra es una región del norte de España con una superficie aproximada de 10.391 Km² (El 2,2 % de España) y una población de 636.038 habitantes (Instituto Nacional de Estadística, 2010).

La comunidad foral, está compuesta por 272 municipios y se sitúa al suroeste de la cordillera pirenaica, limitando al norte con Francia (Departamento de Pirineos Atlánticos), al este y sureste con Aragón (Provincias de Huesca y Zaragoza), por el sur con la comunidad de La Rioja y por el oeste con la comunidad autónoma vasca (Provincias de Álava y Guipúzcoa).

Su capital, Pamplona, con casi 200.000 habitantes (Instituto Nacional de Estadística, 2010) se localiza más o menos en el centro de Navarra rodeada de distintas cadenas montañosas en lo que se denomina la Cuenca de Pamplona (Área Metropolitana de Pamplona), y en donde se concentra más de la mitad de la población total de la comunidad.

Aunque de vertiente mediterránea, la cercanía a las divisorias atlánticas y la relativamente escasa altitud de las mismas, proporciona a toda la zona una situación de transición climática y biogeográfica muy fuerte.

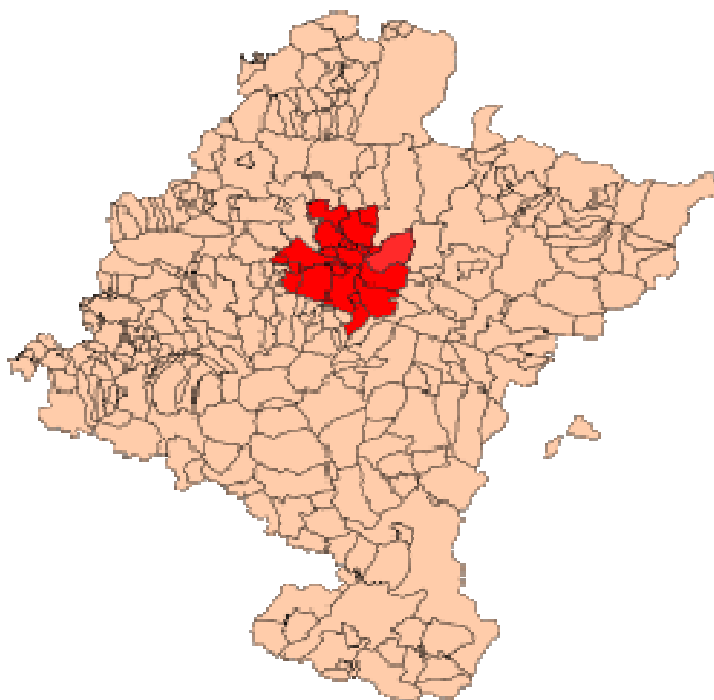


Figura 2.- Municipios que conforman el Área Metropolitana de Pamplona.

La cuenca del río Arga comprende territorio drenado por el río que le da nombre y por varios afluentes, entre los que destacan el Araquil, Ulzama, Elorz y Salado, abarcando 82 municipios de la Comunidad Foral de Navarra y 4 del País Vasco.

El Arga es uno de los principales afluentes del río Aragón, que a su vez y pocos kilómetros hacia el sur, desemboca en el río Ebro. Su cuenca incluye territorios muy diferenciados que van desde las montañas en el norte, a las extensas llanuras en el sur de la comunidad.

La zona de estudio de este trabajo, únicamente comprende la extensión de la cuenca que abarca el río Arga desde su nacedero hasta la localidad de Arazuri, incluyendo los respectivos afluentes.

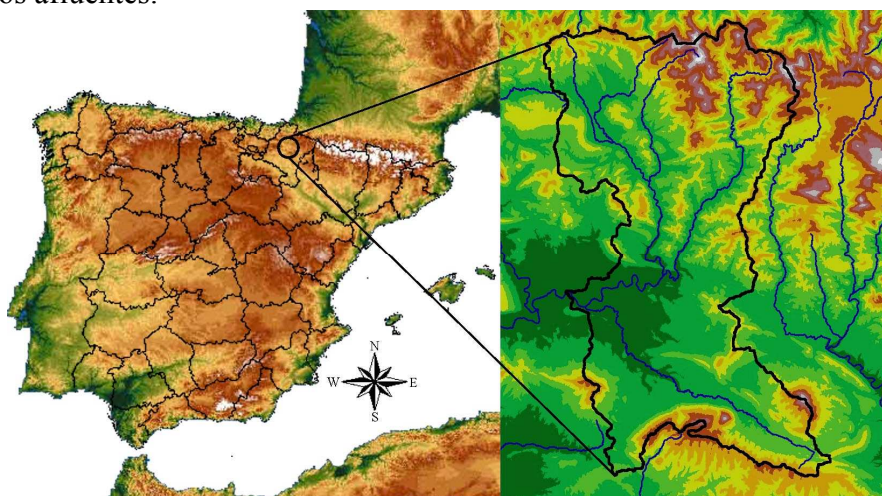


Figura 3.- Mapa de España con la zona de estudio remarcada.



Figura 4.- Mapa de toda la cuenca del río Arga.

(Fuente: Gobierno de Navarra)

2.2. Descripción física de la cuenca.

2.2.1. El río principal: El río Arga.

El río Arga nace en los montes de Quinto Real, en la vertiente meridional del collado de Urquiaga, al norte de Navarra (España). Poco después toma dirección sur, siendo sus aguas represadas en el embalse de Eugui, que con una capacidad de 21 Hm³ constituye el principal reservorio de agua potable para la Mancomunidad de Aguas de la Comarca de Pamplona. Una vez atravesado éste, continúa su curso por el Valle de Esteribar hasta llegar a la entrada de la Cuenca de Pamplona, en donde recibe al río Ulzama en el municipio de Huarte, afluente de gran importancia que duplica el caudal del Arga.

En Huarte, el río Arga presenta un caudal medio anual de 7,18 m³/seg. y justo a la entrada de la cuenca recibe al citado río Ulzama, que procede de los montes de Ulzama-Velate y que con su caudal medio anual de 8,48 m³/seg. hace que se duplique el caudal original del río Arga.

Ambos ríos, hasta llegar a la entrada de la Cuenca de Pamplona, se caracterizan por ser ríos de montaña, con pendientes acusadas que discurren por valles estrechos. Al entrar en la cuenca, el río Arga adquiere un recorrido meandriforme, recibiendo sucesivamente a sus afluentes como el Elorz, el Juslapeña y sobre todo el Araquil, para seguir aguas abajo hacia el Ebro, recorriendo 145 kilómetros sobre una cuenca de 2.759 km² de los que 2.652 pertenecen a la Comunidad Foral de Navarra, desembocando finalmente en el río Aragón.



Figura 5.- Mapa con los ríos en la zona de la cuenca a estudio.

En Pamplona la vega presenta una anchura de 500 a 1500 metros y su régimen hidrológico, manifiesta crecidas espectaculares, que pueden afectar a una amplia extensión de terreno. Como consecuencia de todas estas características, el Arga debería considerarse como un río de gran dinamismo, con fenómenos de erosión en la cara externa de los meandros y ripas, sedimentación y formación de depósitos en la cara interna de los mismos, así como tendencia natural a cambiar el trazado en la llanura aluvial.

Este dinamismo natural se encuentra muy alterado y casi totalmente eliminado por la presencia de numerosas infraestructuras, construcciones (Edificaciones, presas, defensas, puentes, etc...) y aprovechamientos (Huertas, clubes deportivos, equipamientos, etc...), por lo que se puede considerar que su curso está fijado.

2.2.2 Afluentes principales.

- Río Ulzama.

El río Ulzama es el afluente principal del río Arga en la zona de estudio. Este río, de algo más de 38 kilómetros de longitud, nace en las proximidades del puerto de Belate y su cabecera se asienta en el extremo SO del macizo paleozoico de Quinto Real. A su derecha quedan las montañas de la divisoria atlántico-mediterránea cuya reducida altitud facilita la entrada de las lluvias que alimentan los barrancos y regatas que engrosan su cauce en este primer tramo. Durante su recorrido recorre el valle de la Ulzama donde recibe el río Arquil, entra en el valle de Odieta donde recoge las aguas del río Urepel que procede del valle de Atez y las del río Mediano que lo hace del valle de Anue y, tras cruzar por los términos de Olaibar y Ezcabarte, termina desembocando en el Arga a la altura de la localidad de Villava. Drena una cuenca de unos 270 Km².

- El río Elorz.

El río Elorz es el otro principal afluente del río Arga en la zona de estudio. Este río, de 42 kilómetros de longitud, procede de la vertiente Oeste del Puerto de Loiti, donde confluyen varios barrancos que recogen las aguas de la sierra de Izco, sierra de Tabar y la Peña de Izaga. Conforman una cuenca de 282 km². Sus principales afluentes son los ríos Unciti y Sadar, por la margen derecha, y el arroyo del barranco de Errekaldea, que proviene del puerto del Carrascal, por la izquierda. En Pamplona entra por el sur de la meseta de Donapea, en zona lindante con Cizur y sobre un paisaje fundamentalmente agrícola para unirse con el Sadar unos metros antes de la Avenida de Aróstegui, gran eje de entrada a la ciudad desde Estella-Logroño. Discurre después encajado bajo las ripas en el barrio de Echavacoiz y sigue hacia el término de Cizur Mayor entre huertas.

2.2.3. Afluentes secundarios:

- El río Sadar.

El río Sadar, afluente del río Elorz, procede de las sierras de Aranguren y Tajonar, discurriendo en dirección O, entre las margas eocénicas de Pamplona, drenando una cuenca de unos 70 km². Recibe precipitaciones medias de 700 mm., que le aportan un caudal estimado de 12 hm³ anuales. Tiene una longitud de poco más de 18 kilómetros, en donde aproximadamente unos 3,7 kilómetros recorre por Pamplona atravesando los Campus de la Universidad Pública de Navarra y la Universidad de Navarra para, unos metros después, desembocar en el Elorz en el barrio de Echavacoiz. Es un río pequeño, con un caudal escaso, muy encajado en el terreno y que apenas presenta problemas de inundaciones salvo por los efectos de la desembocadura del Elorz. La anchura del cauce, incluidos sus taludes tiene una media de unos 6-8 metros.

- El río Egüés.

El río Urbi o río Egüés, nace en la divisoria de aguas que separa la cuenca de Pamplona con la de Aoiz-Lumbier. Da nombre al valle, el de Egüés, por el que transcurre a lo largo de los poco más de 9 kilómetros que tiene, desembocando en la margen izquierda del río Arga en la localidad de Huarte. Drena una superficie de poco más de 42 km² y aporta un caudal de unos 20 hm³ anuales.

2.2.4. Las masas de agua.

A lo largo de la cuenca del río Arga existen también varios lugares de almacenamiento de masas de agua, tanto naturales como artificiales. A continuación se describen las más importantes dentro de la zona de estudio.

- Embalse de Eugui.

La infraestructura hidráulica del embalse de Eugui, es sin duda, la más importante dentro de la zona de estudio. Está situado en la cabecera del río Arga, bajo el pueblo del que toma el nombre, en el valle de Esteribar. El embalse pertenece a unas estribaciones de los Pirineos en las que hay tres macizos paleozoicos que se hunden en la más moderna cobertura mesozoica. El macizo paleozoico de Quinto Real es el que afecta al embalse y aparece en la parte oriental, al sur del valle del Baztán. Desde un punto de vista litológico, en estos macizos paleozoicos los materiales presentes son esquistos, pizarras, calizas y cuarcitas.

La infraestructura entró en funcionamiento a partir de principios de los 70 con el objetivo principal de atender las demandas de agua de la ciudad de Pamplona y su comarca, aunque ha tenido como función secundaria la de regular el caudal del propio río y la obtención de hidroelectricidad. Tiene una profundidad media de 17 metros, mientras que la profundidad máxima alcanza los 43 metros.

Los principales datos de la presa se recogen en la siguiente tabla.

DATOS ADMINISTRATIVOS Nombre de la presa: EUGUI Fase según RTSPYE: Explotación Titular de la presa: ESTADO Proyectista: J-Ruiz De Azua y Lorca Categoría en función del riesgo potencial: A Fecha de finalización de las obras: 31-12-1972 Coordenadas en UTM 30: 621303 - 4758970	DATOS DEL EMBALSE Superficie del embalse a NMN (ha): 123.00 Capacidad a NMN (hm3): 21.88 Cota del NMN (m): 628.00
DATOS GEOGRÁFICOS Río en el que se encuentra la presa: Arga Municipio: Esteribar Cuenca hidrográfica: Ebro Provincia: Comunidad Foral de Navarra	DATOS DE LA PRESA Tipo de presa: Gravedad Cota coronación (m): 630.00 Altura desde cimientos (m): 51.00 Longitud de coronación (m): 252.00 Cota cimentación (m): 579.00 Cota del cauce en la presa (m): 585.00 Volumen del cuerpo presa (1000 m3): 62.25
USOS DEL EMBALSE Usuarios: Mancomunidad de Aguas de Pamplona. Tipos: Abastecimiento, Hidroeléctrico	DATOS DEL ALIVIADERO Número total de aliviaderos en la presa: 1 Capacidad (m3/s): 270.00 Regulación: Compuertas.
DATOS HIDROLÓGICOS Superficie de la cuenca hidrográfica (km2): 69.00 Aportación media anual (hm3): 124.00 Precipitación media anual (mm): 1,674.00 Caudal punta avenida de proyecto (m3/s): 270.00	DATOS DE LOS DESAGÜES Número total de desagües en la presa: 2 Capacidad (m3/s): 26.03 y 7.36

Tabla 1.- Detalles del embalse de Eugui.

(Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro y MARM).

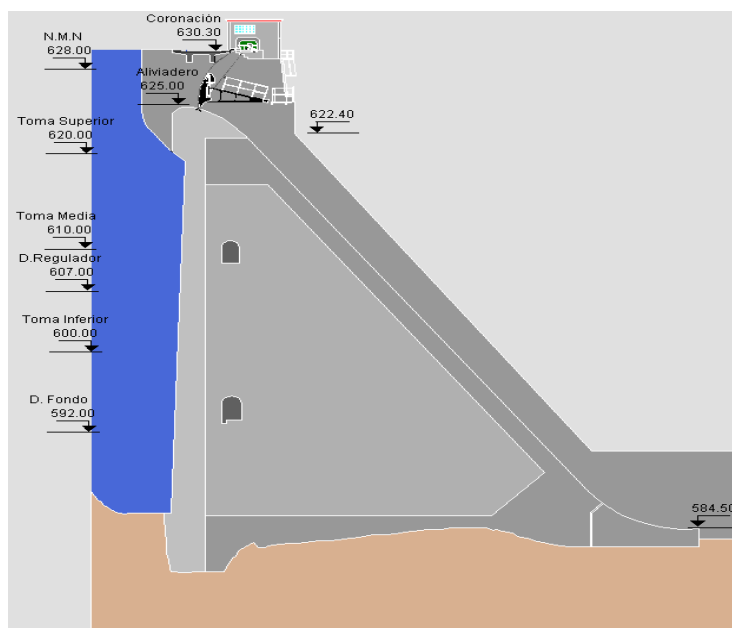


Figura 6.- Detalle del embalse de Eugui.

(Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro y MARM).



Figura 7.- Vistas del embalse de Eugui.

(Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro y MARM).

Desde la construcción del pantano, la regulación producida ha inducido a un cambio del régimen fluvial del río, produciéndose por ejemplo la desaparición de los mínimos estivales característicos en años anteriores a la construcción de la presa (Moreno Colás, 2000).

Por último, cabe destacar que el embalse de Eugui forma parte del Registro de Zonas Protegidas elaborado por la Confederación Hidrográfica del Ebro, en contestación al artículo 6 de la Directiva Marco del Agua (DMA) 2000/60/CE de 23 de octubre de 2000, dentro de la categoría de zonas de extracción de agua para consumo humano.

- Balsa de Ezkoriz.

La balsa de Ezkoriz, junto a la localidad de Zolina, en el valle de Aranguren, es una balsa de desagüe de procedente de las antiguas minas de Potasas, situada en una zona de terreno impermeable y de más de 70 hectáreas que actualmente se encuentra en desuso.

La zona donde está esta balsa, llamada anteriormente “Ezkoriz”, de ahí el nombre, era una pequeña hondonada húmeda y fértil cuyas aguas corrían hacia el río Sadar, hasta que en 1964 se edificara la actual presa. El embalse puede almacenar hasta 5 Hm³, pero rara vez se ha alcanzado tal cota.

Esta balsa, a efectos de este estudio, ha sido considerada como un depósito, ya que su comportamiento no respondía al de un embalse, sino que actuaba como un “pozo”, tal y como se cita posteriormente, con la repercusión que ello conlleva.



Figura 8.- Vista general de la balsa de Ezkoriz.

(Fuente: Elaboración Propia).



Figura 9.- Vistas donde se muestra mayor detalle de la presa y el aliviadero de la balsa de Ezkoriz.

(Fuente: Elaboración Propia).

- El embalse de Monreal.

Es un pequeño embalse de regulación de las aguas del Canal de Navarra terminado el 31 de diciembre de 2005, y que originariamente se denominó balsa de Unciti. Las aguas provienen mediante canalización cerrada desde el embalse de Itoiz, que está fuera de la cuenca de estudio, aunque se juntan con las aguas de cabecera del río Unciti.

La presa está situada entre los términos de Unciti y Monreal y separa los tramos 2 y 3 del Canal de Navarra. Tiene una altura de 18,77 metros y una longitud de coronación de 354,8 metros. Ocupa una superficie de 10,5 Ha y la capacidad total es de 0,575 hm³.



Figura 10.- Vistas generales del embalse de Monreal.

(Fuente: Gobierno de Navarra).

El aliviadero y los desagües de fondo vierten sobre el río Unciti, permitiendo en caso de necesidad la aportación de un mayor caudal a dicho río.



Figura 11.- Vistas en detalle de la aportación del embalse de Monreal al río Unciti.

(Fuente: Elaboración Propia).

Dado que la aportación de caudal desde este depósito de agua al río se realiza de forma irregular y principalmente como aguas para caudal ecológico, y en especial en época de estiaje, no se ha tenido en cuenta en el estudio.

- Otras balsas y embalses.

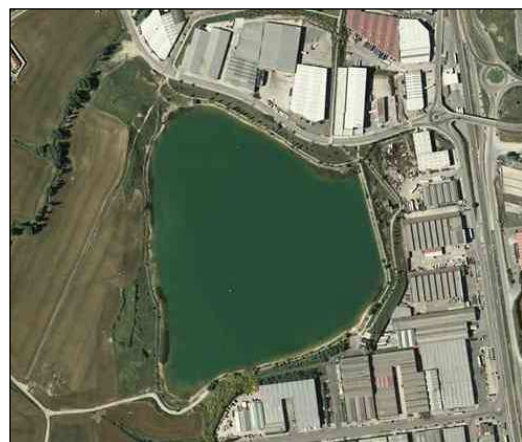
Dentro de la zona de estudio existen otras balsas, tanto naturales como artificiales, las cuales tampoco se han tenido en consideración ya que son insignificantes para el estudio.

La Morea, Ilarratz, Beriainz, Guenduláin, Muskildigorri, Celigueta, u otros lagos artificiales recreativos (Barañáin, Mendillorri, El Pinar-Ardoi, etc...) son, entre otros, algunos de dichos enclaves.



Figura 12.- Vistas de la balsa de La Morea en Beriáin, cuya extensión es de unas 13 hectáreas aproximadamente.

(Fuente: Elaboración Propia y SITNA).



2.2.5. La vegetación.

El paisaje vegetal de la zona norte de la cuenca del Arga está formado fundamentalmente por hayedos (*Fagus sylvatica*). Aguas abajo del embalse de Eugui, la cuenca queda colonizada por el bosque de roble pubescente (*Quercus humilis* Mill.) con pino albar (*Pinus sylvestris*), siempre acompañado por especies arbustivas como por ejemplo el boj (*Buxus sempervirens*). El hayedo queda recluido en las orientaciones norte y noroeste. A partir de Huarte la llanura de inundación queda ocupada por sauces grises (*Salix eleagnos*).

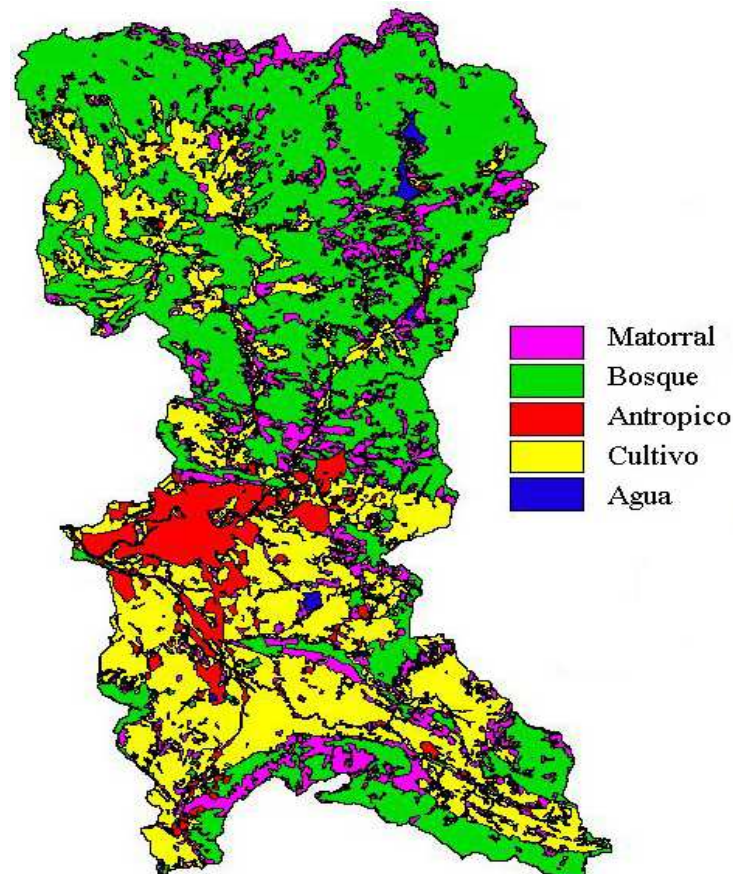


Figura 13.- Mapa del uso del suelo.

La cuenca del Ulzama en su parte alta esta caracterizada por el robledal de *Quercus robur* con abundancia de sotobosque y arbolillos, además de cultivos de repoblación de chopos híbridos. Amplias praderas bordeadas de setos vivos forman el fondo del valle aprovechando por una rica cabaña ganadera. En su parte baja, además del bosque de roble pubescente, hay cultivos y pequeñas praderas.

Ya la zona más hacia el sur de la cuenca, atravesada por el río Elorz y sus afluentes, se compone fundamentalmente por cultivos herbáceos y cereales, además zona de repoblación con pino de Austria.

2.2.6. La geología.

La cabecera de la cuenca del río Arga se asienta en los terrenos paleozoicos de Quinto Real, y hasta el pantano de Eugui el substrato es silicio, mientras que aguas abajo aparecen substratos de caliza dura y flish. La parte media de la cuenca, a partir de Huarte, está formada por margas, además de arcillas y areniscas.

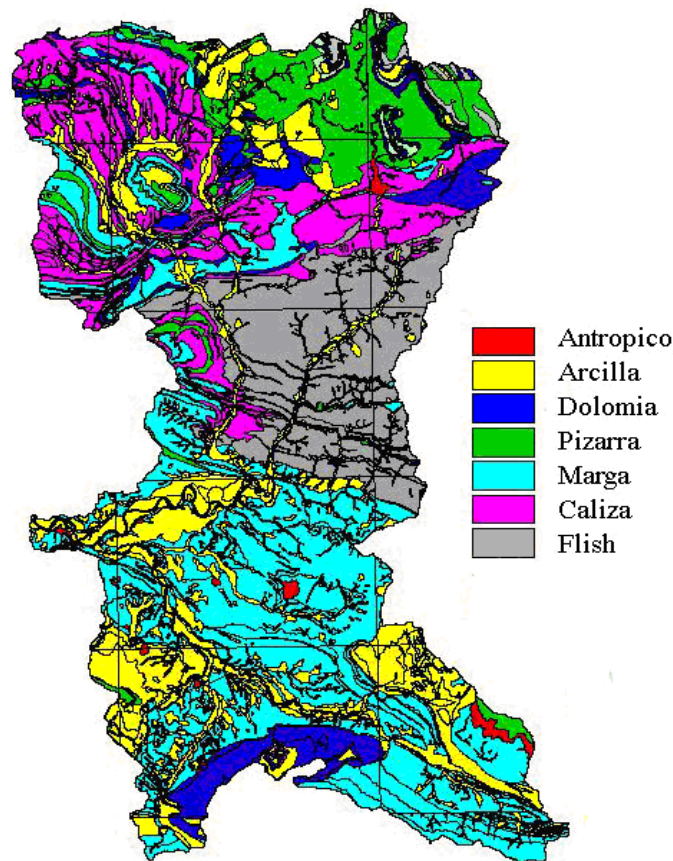


Figura 14.- Mapa geológico.

La cuenca del río Ulzama, que nace en el macizo paleozoico de Quinto real, tiene en su parte alta una composición muy variada, siendo compuesta por calizas, areniscas, conglomerados, afloramientos de esquistos. Aguas abajo entra en terrenos eocénicos de flish intercalados con calizas arcillosas, que en su tramo final enlazan con las margas.

El Elorz se inscribe en las margas eocénicas que ocupan el fondo de la cuenca, entre las areniscas de la Sierra de Tajonar y los niveles calizos de la Sierra de Alaiz.

2.3 Las estaciones de medida.

Para realizar este estudio hidrológico de la cuenca del río Arga, se ha necesitado trabajar con los parámetros característicos de este tipo de estudios, como son la precipitación y el caudal de los ríos. Para los datos de precipitación se han utilizados como es lógico, las estaciones meteorológicas, mientras que para los caudales se han utilizado las estaciones de aforo.

Este es el mapa completo, con la localización de las estaciones meteorológicas y de aforo, así como las masas de agua y los ríos, de la zona en estudio.

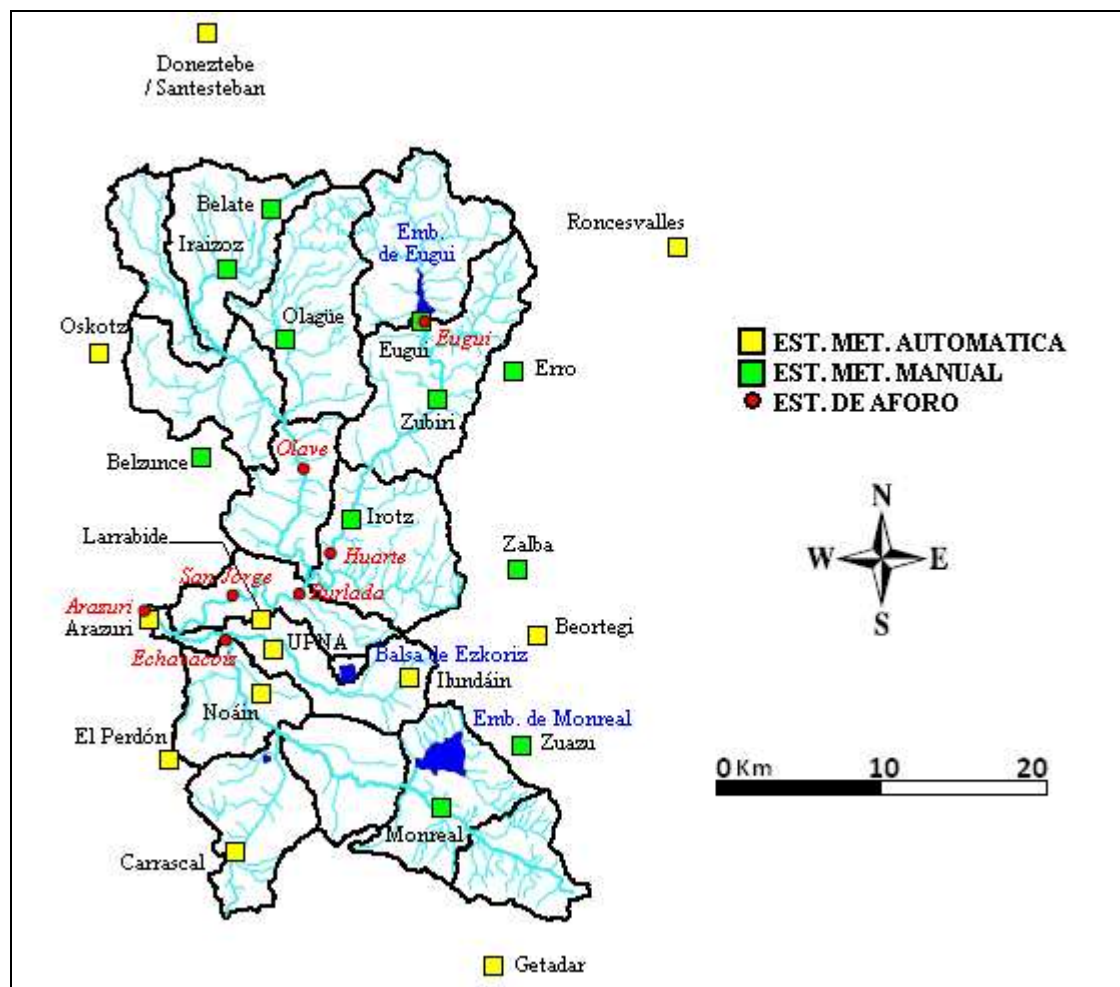


Figura 15.- Mapa detallado de la zona de estudio.

2.3.1. Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA).

Las estaciones meteorológicas automáticas utilizadas se encuentran situadas tanto dentro como fuera de la cuenca de estudio y han proporcionado valores de precipitación diezminutales, a excepción de la de Arazuri, que han sido cada 30 minutos.

La tabla siguiente (Tabla 2) contiene todos los principales detalles de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) utilizadas en el estudio:

Código	Estación	Longitud (X)	Latitud (Y)	Altitud (Z)	Propiedad	Tipo de Dato	Fecha de Instalación
243	Arazuri	604479	4740699	396,0	RN	30 Min.	10/03/2000
12	Beortegi	628103	4739750	580,0	GN	10 Min.	01/01/1998
24	El Carrascal	609766	4726608	568,0	GN	10 Min.	25/01/1991
42	Doneztebe - Santesteban	609004	4776402	125,0	GN	10 Min.	19/06/1999
28	El Perdón	605734	4732087	1.024,0	GN	10 Min.	24/04/1991
405	ETSIA (Pamplona)	612067	4738834	500,0	UPNA	10 Min.	01/04/2004
246	Getadar	625357	4719604	710,0	GN	10 Min.	22/07/2000
13	Ilundáin	620312	4737203	555,0	AEMET	10 Min.	04/09/1991
27	Larrabide (Pamplona)	611356	4740669	462,0	GN	10 Min.	25/07/1997
16	Noáin	611323	4736171	456,0	AEMET	10 Min.	01/01/1992
37	Oskotz	601463	4756774	562,0	GN	10 Min.	01/04/1999
17	Roncesvalles - Orreaga	636569	4763261	947,0	AEMET	10 Min.	06/03/1992

Tabla 2.- Detalles de las EMAs.



Figura 16.- EMA de Arazuri y Oskotz.

(Fuente: Meteo.Navarra).

2.3.2 Estaciones Meteorológicas Manuales (EMM).

De forma análoga a las EMAs, las estaciones meteorológicas manuales utilizadas se encuentran situadas tanto dentro como fuera de la cuenca de estudio y han proporcionado valores de precipitación, pero en este caso diarios.

La tabla siguiente (Tabla 3) contiene todos los principales detalles de las Estaciones Meteorológicas Manuales (EMM) utilizadas en el estudio:

Código	Estación	Longitud (X)	Latitud (Y)	Altitud (Z)	Propiedad	Tipo de Dato	Fecha de Instalación
84	Belate	611887	4765643	796,7	GN	Diario	01/10/1987
85	Belzunce	607649	4750534	530,0	GN	Diario	01/10/1987
114	Erro	626606	4755753	671,9	GN	Diario	01/05/1975
121	Eugui	621043	4758827	616,9	GN	Diario	01/01/1968
141	Iraizoz	609226	4761912	550,0	GN	Diario	01/03/1970
142	Irotz	616819	4746715	478,5	GN	Diario	01/01/1975
175	Monreal	622135	4729202	528,0	GN	Diario	01/09/1929
183	Olagüe	612817	4757617	548,6	GN	Diario	01/05/1975
237	Zalba	626813	4743749	565,0	GN	Diario	01/06/1993
238	Zuazu	627048	4733048	631,0	GN	Diario	01/07/1987
239	Zubiri	622044	4754012	526,0	GN	Diario	01/10/1929

Tabla 3- Detalles de las EMMs.



Figura 17.- EMM de Monreal.

(Fuente: Elaboración Propia).

Tanto las EMAs como las EMMs, pertenecen a distintos organismos como son la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), el Gobierno de España mediante el Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM), el Gobierno de Navarra (GN), la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), la empresa pública Riegos de Navarra S.A. (RN), o la Universidad Pública de Navarra (UPNA).

Sin embargo, no todas las estaciones meteorológicas dentro de la zona o relativamente próximas a la misma, han sido utilizadas ya que en algunos casos se ha desechado por una falta de continuidad en los datos, por la poca aportación que ofrece la misma por causas diversas, o bien, en el caso de alguna estación meteorológica manual, porque coexistía con una automática.

2.3.3. Estaciones de Aforo (EA).

Las estaciones de aforo han aportado los datos de caudal del río principal, el Arga, así como de los dos principales afluentes; Ulzama y Elorz.

Los datos aportados por las diversas estaciones de aforo, han sido de forma quinceminutal en las de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), y diezminutal en las del Gobierno de Navarra (GN).

A continuación se presenta una tabla (Tabla 4) con los principales detalles de las Estaciones de Aforo (EA) utilizadas en el estudio:

Código	Estación	Longitud (X)	Latitud (Y)	Altitud (Z)	Propiedad	Río	Fecha de Instalación	Tipo de Dato
AN441	Arazuri	604262	4741226	396	GN	Arga	-	10 Min.
A313	Burlada	613616	4742212	420	CHE	Arga	2009	15 Min.
A270	Bº de Echavacoiz (Pamplona)	609132	4739410	410	CHE	Elorz	1992	15 Min.
A152	Eugui	621220	4758783	582	CHE	Arga	1963	15 Min.
A159	Huarte	615391	4744456	455	CHE	Arga	1965	15 Min.
A067	Olave	613878	4749813	465	CHE	Ulzama	1930	15 Min.
AN956	Bº de San Jorge (Pamplona)	6094541	4742061	410	GN	Arga	-	10 Min.

Tabla 4.- Detalles de las Estaciones de Aforo.

Finalmente, la estación de Burlada no se ha podido tener en cuenta en el estudio debido a que la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) está todavía con el proceso de calibración la dicha estación y por lo tanto no han validado los datos recogidos hasta la fecha.

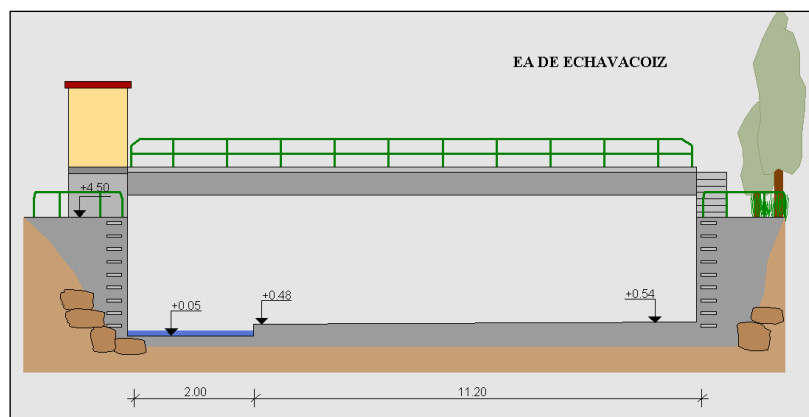


Figura 18.- Estación de aforo en el barrio de Echavacoiz de Pamplona sobre el río Elorz.
(Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro).

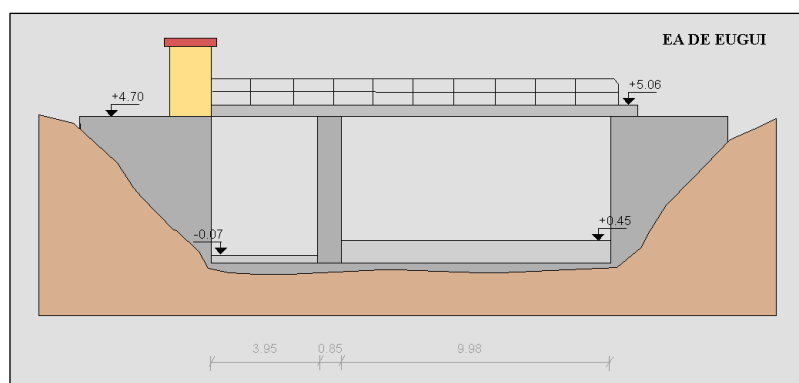


Figura 19.- Estación de aforo de Eugui sobre el río Arga.
(Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro).

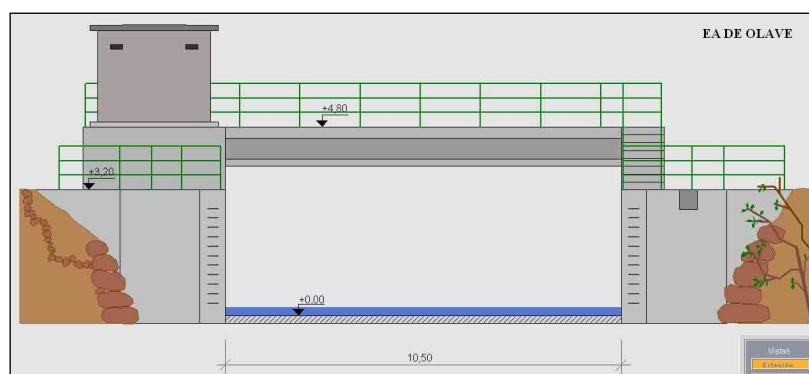


Figura 20.- Estación de aforo de Olave sobre el río Ulzama.
(Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro).



Figura 21.- Estación de aforo de Arazuri.
(Fuente: *Elaboración Propia*).



Figura 22.- Estación de aforo y de calidad de aguas situada junto al denominado ‘Puente de los Tubos’ en el barrio pamplonés de San Jorge.
(Fuente: *Elaboración Propia*).



Figura 23.- Estación de aforo de Olave.
(Fuente: *Confederación Hidrográfica del Ebro*).



3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO.

3.1. El modelo hidrológico HEC-HMS.

El modelo HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) es un modelo lluvia-escorrentía, desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* (HEC) del U.S. Army Corps of Engineers (USACE), que está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de un periodo de lluvia.

El antecedente de este modelo, el HEC-1 (HEC, 1990), nació como un modelo de eventos y ha sido considerado por muchos como el modelo más versátil (Bedient y Huber, 1992) y probablemente el más ampliamente utilizado en este tipo de caracterizaciones hidrológicas de avenidas.

En este trabajo se ha utilizado el HEC-HMS 3.5 (HEC, 2010), versión que ya incluye la posibilidad de simular el proceso lluvia-escorrentía en tiempo continuo, aunque el objetivo de este trabajo, simulación de avenidas, no requiera esta opción.



Figura 24.- Icono del programa HEC-HMS.

La simulación de la red de drenaje de una cuenca constituye la base del modelo. Todas las demás opciones están desarrolladas sobre la capacidad de cálculo de hidrogramas en cualquier punto de la cuenca (Viessman, 1996). Los componentes del modelo funcionan basados en relaciones matemáticas simples que tratan de representar los procesos que intervienen en la generación y circulación de los hidrogramas de escorrentía: pérdidas, transformación del exceso de lluvia en caudal de salida de la cuenca, adición del flujo base, circulación del hidrograma por el cauce, etc...

En este caso, hay una serie de condicionantes o limitaciones que por distintos motivos tiene el modelo aplicado:

- La simulación se limita a eventos de lluvia (modelo de eventos), consecuencia de la propia aplicación del modelo a la simulación de avenidas
- En la modelación no se incluye la escorrentía subsuperficial al no disponer de valores de los parámetros que caracterizan el mismo.
- No se tiene en cuenta la presencia de nieve, es importante, por lo tanto, conocer si en cada evento ha habido o es importante la presencia de nieve.

El punto de partida, por lo tanto, es estructurar físicamente la cuenca en base a la red fluvial, considerando, por una parte, las superficies generadoras de hidrogramas de escorrentía (sistemas hidrológicos o subcuencas), y, por otra, las unidades o sistemas hidráulicos por los que circulan dichos hidrogramas (cauces, embalses, etc.).

Cuando la cuenca es suficientemente pequeña, la representación de la cuenca se puede realizar de forma agregada, es decir considerando la cuenca como una unidad.

Cuando, por el contrario, la cuenca es suficientemente grande como para que los procesos de circulación adquieran cierto protagonismo y la variabilidad de la lluvia se manifieste con claridad, es preciso representar la cuenca de forma distribuida como una red ramificada de sistemas hidrológicos-hidráulicos (subcuencas-embalses) conectados por sistemas hidráulicos (cauces). Cada sistema se caracteriza fundamentalmente por dos elementos: una serie de parámetros que especifiquen las características particulares del mismo, y unas relaciones matemáticas que rigen su comportamiento.

3.2. División en subcuencas.

Una subcuenca es un elemento que normalmente no tiene flujo de entrada y sólo presenta un punto de salida. El flujo de salida se calcula a partir de datos meteorológicos mediante substracción de pérdidas, transformación de la excedencia de precipitaciones, y adición del flujo en entrada.

La información de partida para determinar este modelo estructurado de subcuencas y canales es la red fluvial del mapa cartográfico de Navarra 1:25000 y el modelo de elevación digital MED (25x25) del Gobierno de Navarra, y el Sistema de Información Geográfico (SIG) con el se ha trabajado es *ArcView 3.2* de ESRI. A partir de la información tratada y generada en este soporte, *ArcView 3.2*, se ha utilizado *HEC-GeoHMS 1.1* para volcar dicha información al HEC-HMS y construir el modelo conceptual de subcuencas y canales. El proceso seguido es el siguiente:

1. Determinar el contorno de la cuenca objeto de estudio a partir del MED mencionado y considerando el punto definido por la estación de aforo de Arazuri como punto de drenaje de la red fluvial de la cuenca.
2. Delimitación de las subcuencas atendiendo a distintos criterios:
 - 2.a. Se parte de las subcuencas generadas por la red de afluentes principales: Arga, Ulzama y Elorz.
 - 2.b. Cada una de estas subcuencas se subdivide a su vez en otras de superficie similar, dividiendo los tramos de cauce en tramos de longitud parecida.
 - 2.c. El embalse de Eugui, como tiene una estación de aforo a la salida, se ha considerado como una subcuenca que aporta el hidrograma registrado en la estación de aforo.
 - 2.d. La cuenca vertiente a la balsa de Ezkoriz, al ser muy pequeña y no tener desagüe, se considera como un pozo.
 - 2.e. No se ha tenido en cuenta la balsa de Monreal por servir únicamente como aporte de caudal ecológico del río Unciti.
 - 2.f. El resto de masas de agua existentes en la cuenca tampoco se han tenido en cuenta en el estudio dada la escasa importancia.

De esta forma se llega a la estructura de subcuencas, mostrada en la Figura 25, que en HEC-HMS genera el modelo conceptual que se presenta en la Figura 26. En la Tabla 5 se presentan las características esenciales de los sistemas: área de las subcuencas y longitud de los tramos de cauces de ríos. La obtención de estos mapas y el modelo HEC-HMS se explica de forma más detallada en los Anexos I y II.

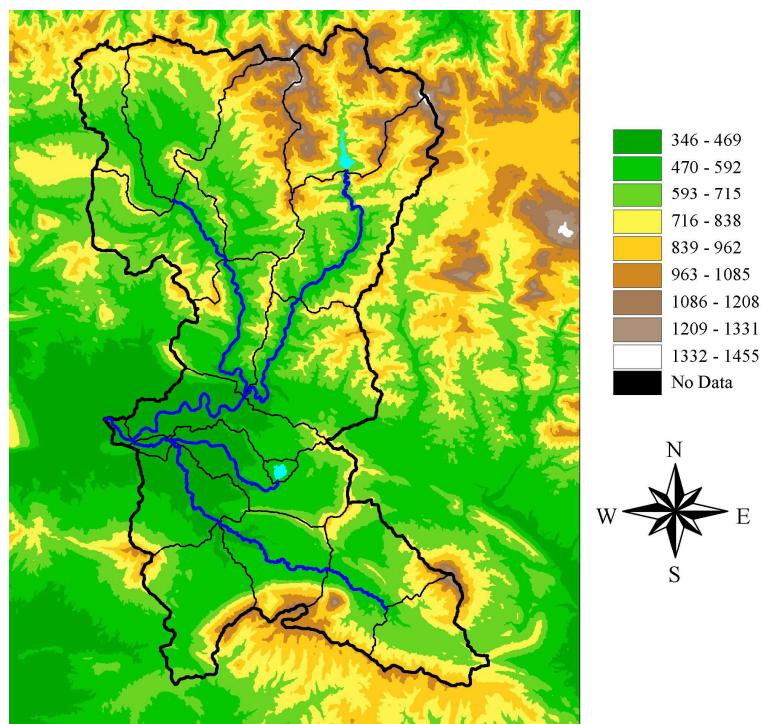


Figura 25.- Representación de la cuenca del Arga en Arazuri, dividida en subcuencas y con la red fluvial.

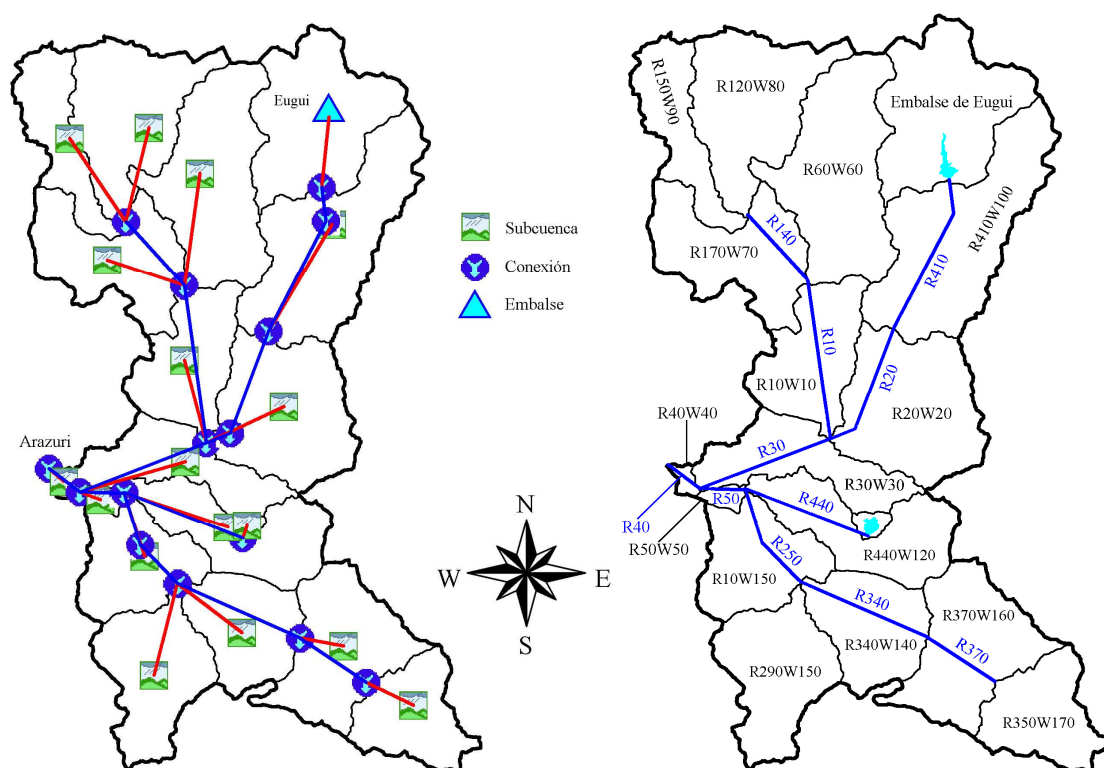


Figura 26.- Modelo conceptual HEC-HMS de la cuenca del Arga en Arazuri con la representación de los sistemas hidrológicos (subcuencas) e hidráulicos (cauces).

Subcuenca	Área (km ²)	Cauces	Longitud (m)
R10W10	43,618	R10	14119,3
R20W20	67,716	R20	4106,7
R30W30	39,451	R40	2894,0
R40W40	2,341	R30	14123,9
R50W50	3,246	R50	3529,9
R60W60	74,530	R140	6447,7
R170W70	52,553	R200	8309,1
R120W80	61,437	R250	4748,1
R150W90	32,739	R280	4437,0
R410W100	83,099	R340	15309,8
R440W120	45,535	R370	6241,6
R310W130	41,029	R380	10863,7
R340W140	40,997	R410	3661,0
R290W150	50,085	R440	10742,9
R370W160	56,328		
R350W170	37,076		
R390W180	68,836		
R420W190	2,866		

Tabla 5.- Valores de las áreas de las subcuencas y de las longitudes de los distintos tramos de río establecidos.

3.3. Determinación de la lluvia areal: Polígonos de Thiessen.

Definido y establecido el modelo conceptual morfológico de la cuenca es preciso representar los procesos involucrados en la generación del hidrograma en el punto de salida mediante relaciones matemáticas sencillas.

Se parte de los yetogramas de lluvia registrados en las distintas estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca, con éstos y con las zonas de influencia de cada estación, que se pueden determinar mediante diferentes métodos, se puede determinar los yetogramas de precipitación total (YPT) en cada subcuenca (entrada al modelo).

De estos YPT hay que estimar la fracción que genera escorrentía superficial directa denominada yetograma de precipitación efectiva (YPE), también para cada cuenca. Estos YPE en definitiva son alturas de precipitación que quedan disponibles para escurrir sobre la superficie del suelo de la cuenca, por lo tanto, es necesario circular ese YPE por la cuenca para generar el hidrograma de escorrentía superficial en el punto de desagüe de la cuenca.

Y, por último, los hidrogramas así generados hay que circularlos a lo largo de la red de cauces hasta el punto de drenaje de la cuenca objeto de estudio, en los puntos de confluencia de la red los hidrogramas se suman. En síntesis estos son los procesos esenciales que contempla el modelo, a continuación se describen las metodologías adoptadas.

Yetograma de Precipitación Total (YPT)

El yetograma de precipitación total, representación de la variación de precipitación en el tiempo, se introduce en el modelo para cada estación meteorológica con influencia en la cuenca objeto de estudio. Pero lo que el modelo necesita es el yetograma de precipitación que cae sobre cada subcuenca. ¿Cómo se determina esto? Previamente en *ArcView* se ha determinado las áreas de influencia de cada estación meteorológica mediante el método de los Polígonos de Thiessen (Anexo I), y se ha realizado para dos casos:

- Utilizando sólo con las EMAs de la cuenca o próximas a ella (Figura 27).
- Con todas las estaciones meteorológicas existentes en la cuenca o próximas a ella, tanto EMAs como EMMs (Figura 28).

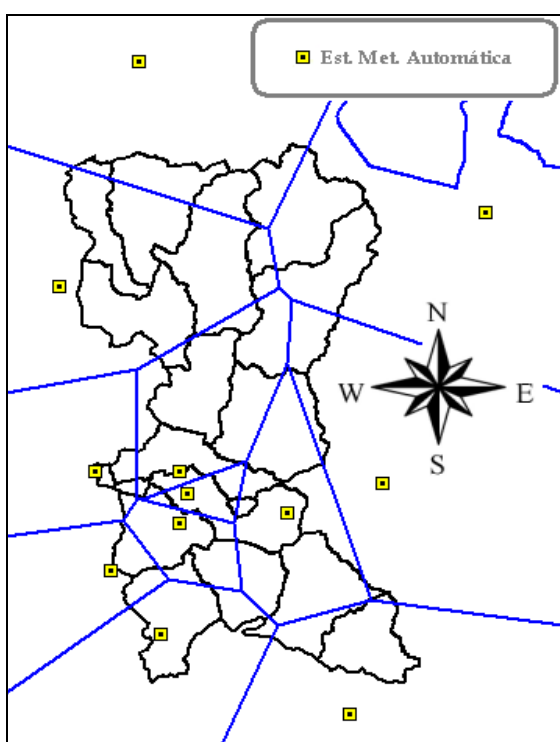


Figura 27.- Polígonos de Thiessen.
sólo con las EMAs utilizadas

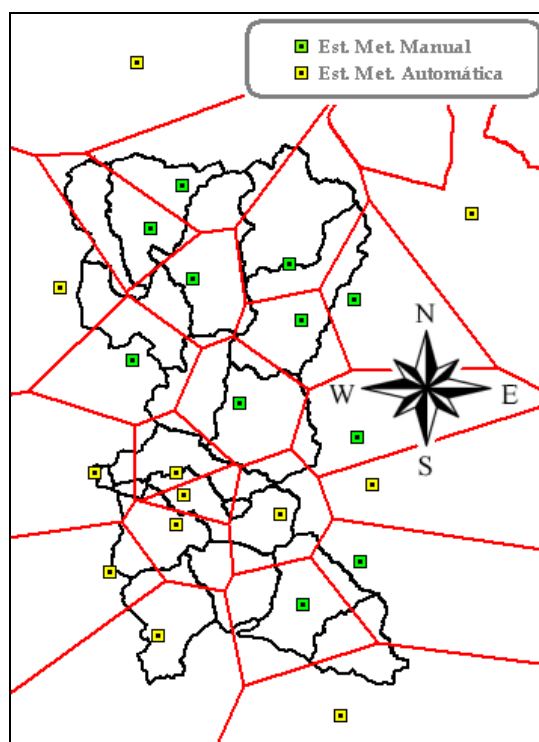


Figura 28.- Polígonos de Thiessen con todas
las estaciones meteorológicas utilizadas.

Por lo tanto, los valores de precipitación del yetograma en cada subcuenca, P_{sb} , y para cada intervalo de tiempo, i , que se suponen uniformes en toda la superficie de cada subcuenca, se determinan como una media ponderada de las precipitaciones, P_{em} , de las distintas estaciones meteorológicas, j , con influencia en la subcuenca, según la ecuación (1):

$$P_{sb}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n P_{em}(i, j) w(j)}{\sum_{j=1}^n w(j)} \quad (1)$$

En donde:

- $P_{sb}(i)$ → Precipitación media uniforme sobre una subcuenca en el intervalo i .
- $P_{em}(i,j)$ → Precipitación en el intervalo i registrada en la estación j .
- $w(j)$ → Área de influencia de la estación j en la subcuenca.
- n → Número de estaciones meteorológicas con influencia en la subcuenca.

3.4. Determinación de la lluvia efectiva: El número de curva.

Yetograma de Precipitación Efectiva (YPE)

La precipitación efectiva es la fracción de la precipitación total que se transforma en escorrentía directa, el resto de la precipitación, que incluye la interceptación de la lluvia por la vegetación, el almacenamiento superficial en el terreno, la evaporación directa y la infiltración del agua en el suelo, es considerada como pérdidas o abstracciones. Para el cálculo de las pérdidas HEC-HMS cuenta con diferentes métodos que utilizar distintas funciones. En este caso como partimos de la información digitalizada del uso y tipo de suelo hemos elegido el método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) o del número de curva (CN) que es uno de los más utilizados en el ámbito profesional.

Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de los EE.UU. (USDA) para estimar las pérdidas (o abstracciones) en un evento de lluvia o aguacero. En este método la altura de lluvia efectiva es función del volumen de precipitación total y de un parámetro de pérdidas denominado **número de curva** o CN . El número de curva varía en el rango de 0 a 100 y depende de factores que influyen en la generación de escorrentía en la cuenca: tipo hidrológico del suelo (Grupo hidrológico-Capacidad de drenaje); uso y manejo del terreno; condición superficial del suelo; y condición de humedad antecedente.

Esta metodología establece que para un acontecimiento de lluvia o aguacero, el volumen de precipitación efectiva, P_e , siempre es menor que la precipitación total, P . La escorrentía superficial directa comienza después de que se alcance un cierto valor de lluvia acumulada, I_a , denominada pérdida (o abstracción) inicial. Este valor viene a representar el volumen de precipitación que queda retenido en la cuenca como consecuencia de la interceptación, infiltración y almacenamiento superficial que se produce al inicio de la lluvia. Una vez iniciada la escorrentía directa, la altura de lluvia adicional almacenada en la cuenca, es decir que no se transforma en escorrentía superficial directa, F_a , es menor o igual a una capacidad de retención, o retención potencial, máxima de la cuenca, S .

La hipótesis del método del SCS fundamentalmente consiste en combinar la relación que liga las cantidades actuales y potenciales (2) con la ecuación de continuidad (3), es decir, que la fracción de retención real entre potencial es igual a la fracción de escorrentía directa real (precipitación efectiva) entre potencial (precipitación total).

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (2)$$

Siendo la ecuación de continuidad,

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (3)$$

Combinando ambas ecuaciones y resolviendo para P_e se obtiene que la ecuación básica para el cálculo de la escorrentía directa es:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (4)$$

Para simplificar la expresión (4), las pérdidas iniciales, I_a , se relacionan con la capacidad de retención máxima (potencial), S , como sigue:

$$I_a = 0,2 S \quad (5)$$

Esta relación se obtuvo en base a datos de numerosas cuencas pequeñas experimentales instaladas a lo largo de los EE.UU.. El coeficiente 0,2 ha sido objeto de un amplio contraste pero, sin embargo, este valor ha sido recomendado por el SCS como estándar del coeficiente de pérdidas iniciales. En trabajos de investigación donde se disponen de datos precipitación-caudal de cierta garantía, es posible y conveniente considerar este coeficiente de pérdidas iniciales, C_p , como un parámetro adicional del método del Número de Curva ($I_a = C_p S$). Introduciendo (5) en la ecuación (4), la expresión de la precipitación efectiva queda:

$$P_e = \frac{(P - 0,2 S)^2}{P + 0,8 S} \quad (7)$$

La cual está sujeta a la restricción $P \geq 0,2 \cdot S$.

Los estudios realizados por el SCS permitieron relacionar la retención máxima potencial, S , con un parámetro de referencia empírico y adimensional que se denomina **número de curva, CN**, cuyos valores se encuentran en el rango de 0 a 100. El valor de 100 corresponde a superficies impermeables donde la capacidad de almacenamiento de la cuenca es 0 (no hay posibilidad de pérdidas o abstracciones) y, por el contrario, 0 es para superficies totalmente permeables donde la capacidad de almacenamiento es ilimitado (todo lo precipitado sería pérdidas). Su expresión en mm es:

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (8)$$

Para la estimación del CN en cuencas no aforadas se parte de tablas que han sido elaboradas por diferentes Organismos de la Administración de EE.UU. (SCS, 1.985; Forest Service, 1.959) disponibles en Ponce (1.989). En estas tablas de valores de CN se intentan describir situaciones complejas en las que se combinan distintas condiciones: grupo hidrológico de suelo, tratamiento y uso de la tierra (suelo), condición hidrológica de la superficie, y condición antecedente de humedad. Con estas tablas y la información digital disponible de la cuenca: Mapa de suelos (1:50.000, Departamento de Edafología de la Universidad de Navarra) y Mapa de usos (1:25.000, Gobierno de Navarra) se ha elaborado el mapa de CN de la cuenca del río Arga para unas condiciones de humedad de referencia medias, que se presenta en la Figura 29. Con este mapa se han determinado los valores de CN medios de las distintas subcuencas que se presentan en la Tabla 6.

En el Anexo I se presentan las distintas tablas de asignación de valores de CN .

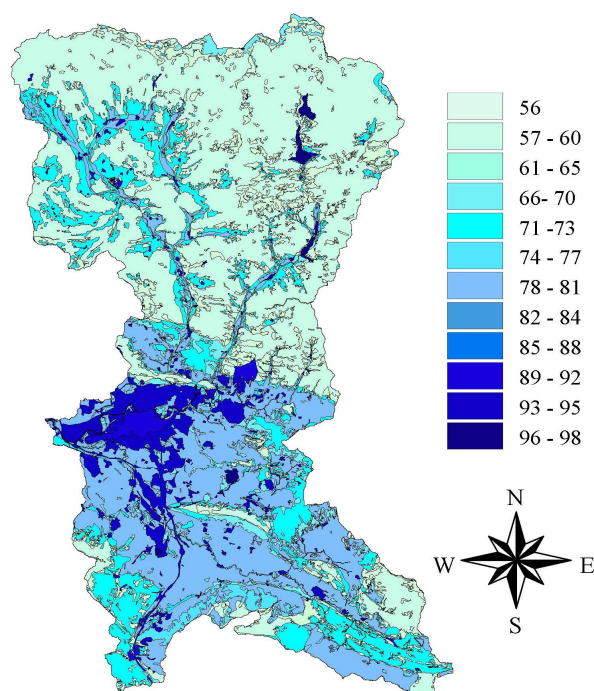


Figura 29.- Mapa de valores de CN para unas condiciones medias de humedad.

Subcuenca	CN	I_a (mm)	T_l (min.)
R10W10	69	22,82	26,40
R20W20	69	22,82	26,04
R30W30	85	8,96	23,15
R40W40	85	8,96	6,30
R50W50	85	8,96	7,32
R60W60	62	31,14	33,30
R170W70	65	27,35	28,50
R120W80	64	28,58	32,28
R150W90	66	26,17	25,80
R410W100	62	31,14	37,38
R440W120	80	12,70	21,96
R310W130	81	11,92	16,20
R340W140	78	14,33	18,06
R290W150	76	16,04	20,22
R370W160	73	18,79	17,04
R350W170	70	21,77	16,08
R390W180	61	32,48	23,34
R420W190	81	11,92	4,50

Tabla 6.- Valores medios de los parámetros de CN, I_a y T_{lag} en cada una de las subcuencas.

3.5. Circulación de la lluvia efectiva a través de la cuenca: Método del H.U.

Este proceso hace referencia a la generación del hidrograma en el punto de drenaje de una cuenca como consecuencia de la circulación de la lluvia efectiva a través de toda la superficie de la cuenca, componente que representa la escorrentía superficial directa. HEC-HMS, al igual que para los demás componentes del modelo, dispone de diferentes métodos para determinar este hidrograma de escorrentía directa. En este trabajo se ha seleccionado la técnica del **Hidrograma Unitario** y, dentro de ésta, se ha elegido el **Adimensional del SCS** por ser un método sencillo ampliamente aplicado en multitud de casos.

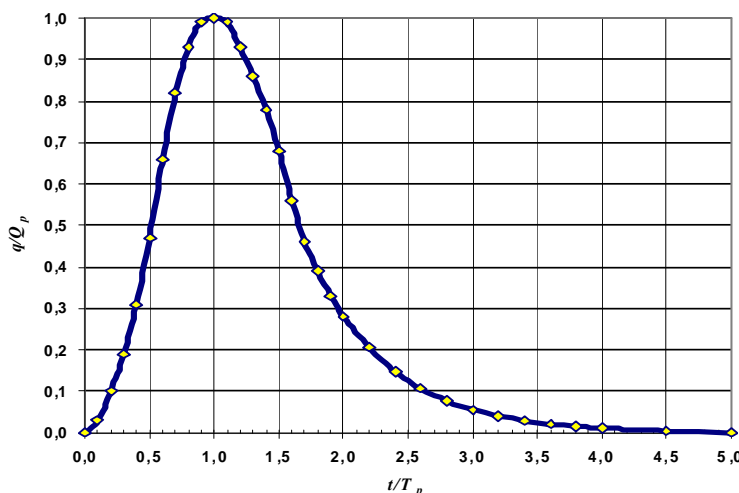


Figura 30.- El Hidrograma Unitario adimensional del SCS.

En el HU Adimensional del SCS se desarrolló en la década de los 50 en base a observaciones de numerosas cuencas agrícolas repartidas a lo largo de toda la geografía de los EE.UU. Las variables están adimensionalizadas, haciendo el mismo de ámbito universal, el caudal se representa, q , dividido por el caudal punta generado en la cuenca objeto de estudio, Q_p , (q/Q_p) en función del tiempo, t , dividido por el tiempo al pico, T_p , (t/T_p), tal como se presenta en la Figura 8.

Dado que el área bajo el HU debe ser igual a un volumen de escorrentía unitario, se puede demostrar, en base a una revisión de un gran número de HU obtenidos en los EE.UU. (Chow, 1994), que:

$$Q_p = \frac{C \cdot A}{T_p} \quad (9)$$

En donde:

- Q_p → Caudal máximo (pico) en $m^3/\text{seg.}$ por cm. de lluvia efectiva.
- C → Constante (2,08).
- A → Superficie de la cuenca (En Km^2).
- T_p → Tiempo al pico. Su valor es:

$$T_p = \frac{T_y}{2} + T_l \quad (10)$$

En donde:

- T_y → Duración del pulso de lluvia.
- T_l → Tiempo de desfase o de retardo de la cuenca (tiempo comprendido entre el centro de gravedad del pulso de lluvia y el instante del caudal máximo). Se determina mediante la expresión.

$$T_l = \frac{L^{0,8} (2540 - 22,86 CN)^{0,7}}{14,104 CN^{0,7} I^{0,5}} \quad (11)$$

En donde:

- L → Longitud del cauce principal en m hasta la divisoria de la cuenca.
- I → Pendiente media de la cuenca (En m/m).
- CN → Valor del número de curva medio de la cuenca.

Los valores de T_l para cada subcuenca se presentan en la Tabla 6.

3.6. Circulación los hidrogramas a lo largo de los cauces: Muskingum.

Los métodos de circulación de avenidas o hidrogramas permite determinar el tiempo y la magnitud del caudal en un punto de un curso de agua utilizando hidrogramas conocidos en uno o más puntos aguas arriba. De los diferentes métodos que HEC-HMS tiene implementados para circular los hidrogramas generados en las subcuencas a través de los cauces se ha elegido el método de **Muskingum**. Ésta es la técnica hidrológica más difundida para manejar relaciones variables de descargas-almacenamientos (Chow, 1994).

Este método modela el almacenamiento volumétrico de los hidrogramas a lo largo de los cauces de los ríos mediante la combinación de dos almacenamientos conceptuales: uno en forma de cuña y otro en forma de prisma. La ecuación fundamental de este método es:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (12)$$

En donde:

- I_i → Caudal entrante en un tramo en el instante i .
- Q_i → Caudal saliente del mismo tramo en el instante i .
- C_1, C_2 , y C_3 → constantes que dependen de dos parámetros: k y x que son los parámetros del modelo, y que representan respectivamente un tiempo de circulación o de tránsito, con dimensiones de tiempo, y un coeficiente de almacenamiento adimensional.

El valor de x depende de la forma del almacenamiento en cuña modelado, así el valor de x oscila entre 0, para un almacenamiento sin cuña (embalse), y 0,5, para el caso de que exista una cuña perfectamente definida. El modelo es poco sensible al valor de x y normalmente para corrientes naturales se asume un valor medio próximo a 0,2 (Chow, 1994). En nuestro caso se ha asumido este valor para todos los cauces. El tiempo de tránsito o circulación del hidrograma de avenida, k , en cada uno de los tramos de cauces de ríos se ha estimado a partir de la celeridad de la onda de avenida cuyo valor se ha determinado en base a estudios hidráulicos realizados y a los valores de pendiente medias de los tramos.

Es necesario indicar también el número de subtramos de cada tramo. Para la aproximación de este parámetro se ha dividido la longitud de cada tramo por el producto de celeridad y el intervalo de tiempo de simulación elegido (Tabla 7).

$$Subr = \frac{L}{c \times \Delta t \times 60} \quad (13)$$

En esta Tabla 7 se presentan los valores de los parámetros del modelo de Muskingum para cada uno de los canales considerados en el modelo de la cuenca. Para asignar correctamente estos valores se hizo una comparación con el “*Estudio Hidráulico del río Arga en la Comarca de Pamplona*” (Ayuntamiento de Pamplona, 1998), resultando adecuada la estimación utilizada para este trabajo.

Tramo	Longitud (m)	c (m/s)	x	k (h)	Subtramos
R10	14119,3	1,5	0,2	2,6	16
R20	4106,7	1,1	0,2	1,0	6
R40	2894,0	1,3	0,2	0,6	4
R30	14123,9	1,3	0,2	3,0	18
R50	3529,9	1,5	0,2	0,7	4
R140	6447,7	1,5	0,2	1,2	7
R200	8309,1	1,1	0,2	2,1	13
R250	4748,1	1,1	0,2	1,2	7
R280	4437,0	1,1	0,2	1,1	7
R340	15309,8	1,3	0,2	3,3	20
R370	6241,6	1,1	0,2	1,6	9
R380	10863,7	1,5	0,2	2,0	12
R410	3661,0	1,5	0,2	0,7	4
R440	10742,9	1,1	0,2	2,7	16

Tabla 7.- Valores de los parámetros de Muskingum para cada cauce.

4. APLICACIÓN DEL MODELO.

4.1. Introducción.

La caracterización de eventos reales en un modelo se realiza utilizando datos medidos. Algunos de estos datos sirven como base de partida para simular la realidad. En este trabajo este tipo de datos se refieren a las precipitaciones diezminutales de las estaciones automáticas, los datos diarios de las estaciones manuales y los caudales del embalse de Eugui.

Otros datos son necesarios para controlar que la simulación se lleve a cabo de forma correcta, para entonces calibrar y validar el modelo. La calibración del modelo de la cuenca del río Arga se hizo por comparación entre el caudal obtenido por simulación en la localidad de Arazuri (Datos del punto de salida de la cuenca, *Punto de Salida*) y el caudal medido por parte de la estación de aforo de Arazuri, que depende del Departamento de Desarrollo Rural y Medio Ambiente del Gobierno de Navarra.

El conjunto de datos diezminutales de caudal medido en Arazuri se trató para obtener información fundamental para calibrar el modelo en las avenidas del proyecto. A partir del conjunto de datos medidos, se separó el flujo base de la escorrentía directa, se calcularon los parámetros medios de la cuenca por cada avenida y se crearon hidrogramas de precipitación/caudal para estudiar la dinámica de los eventos.

El tratamiento de los datos medidos se realizó para cada una de las avenidas de los eventos estudiados, que en total fueron de 5 eventos.

4.1.1. Los eventos seleccionados.

Para llevar a cabo este proyecto, se ha realizado previamente una recopilación de aquellos eventos más importantes que han tenido lugar en la comarca de Pamplona en los últimos treinta años.

Una vez realizado ese trabajo de investigación, utilizando todas las fuentes de recursos disponibles para ello (Prensa escrita, trabajos y/o estudios realizados en años anteriores, etc...), se han seleccionado algunos de ellos, principalmente los más recientes.

También se ha realizado una descripción más completa de algunos de dichos eventos, tal y como viene recogido en el anexo correspondiente, y como se cita posteriormente.

Hay que matizar, como comentaba, que de todos estos eventos que se citan en la tabla que se muestra a continuación, únicamente se han seleccionado algunos de ellos para realizar las simulaciones, en concreto 5, principalmente por los motivos siguientes:

- Falta total o de menor cantidad de nieve y/o granizo caída en los eventos seleccionados para evitar la complejidad que implican estos dos elementos.
- Falta total o escasez de datos de las estaciones de aforo.
- Falta total o escasez de datos de las estaciones meteorológicas.
- Lejanía en el tiempo y falta general de información.
- Falta de interés del evento por ser muy localizado y puntual.

Utilizando las referencias que ofrece el trabajo final de carrera (TFC) de IGLESIAS MARRODÁN, D. (Mayo 2008) en su *Estudio de los sucesos extraordinarios de lluvia y sus efectos en la cuenca del río Arga*, hasta el año 2007, y siguiendo su formato y sistema descriptivo hasta la actualidad, mediante una elaboración propia, se ha configurado la siguiente tabla en la que se recopilan los eventos de avenida que han tenido lugar en las últimas tres décadas en la cuenca de Pamplona.

AÑO	<u>FECHA</u>		OBSERVACIONES
	MES	DIA	
2010	Julio	21 y 22	Mayor intensidad de lluvia en Pamplona desde que hay datos: 24'7 litros/m ² en 10 minutos.
2010	Febrero	17	
2010	Enero	14	Evento caracterizado + Realizado en HEC-HMS.
2009	Febrero	10 al 12	Evento caracterizado + Realizado en HEC-HMS.
2009	Enero	26 al 28	Evento caracterizado + Realizado en HEC-HMS.
2008	Junio	1 al 3	
2008	Marzo	21 al 26	
2007	Abril	1 al 4	Evento caracterizado + Realizado en HEC-HMS.
2007	Marzo	27 al 31	* Evento caracterizado junto con el de Abril.
2006	Septiembre	21 al 23	
2006	Julio	18 al 20	
2006	Marzo	9 al 11	Evento caracterizado + Realizado en HEC-HMS.
2005	Septiembre	6 al 9	
2005	Enero	18 al 20	
2004	Enero	1 al 3	
2003	Febrero	3 al 5	
2003	Enero	28 al 30	
2002	Diciembre	1 al 4	Evento caracterizado.
2000	Octubre	20 al 22	
1999	Septiembre	13	
1997	Enero	19 al 22	
1996	Julio	25 al 27	
1995	Marzo	3 al 5	
1994	Abril	1 al 3	
1993	Diciembre	24 al 26	Evento caracterizado.
1992	Diciembre	7 al 9	Evento caracterizado.
1992	Octubre	3 al 5	
1991	Mayo	8 al 10	
1990	Septiembre	9 al 11	
1990	Diciembre	9 al 12	
1989	Agosto	4 y 5	
1980	Diciembre	17 al 19	Evento caracterizado.
...
1928	Septiembre	8 y 9	Máxima histórica en Pamplona.

Tabla 8.- Eventos más importantes de los últimos 30 años en la cuenca del Arga.

(Fuente: Elaboración Propia, Diario de Navarra, Diario de Noticias, Meteo.Navarra y Universidad Pública de Navarra).

4.2. Análisis de la correspondencia entre datos.

Una verificación de gran importancia es comprobar que los datos de las precipitaciones y de caudal estén en la misma escala temporal. Se recomienda, por lo tanto, realizar el análisis de la correspondencia temporal entre los datos y verificar la ausencia o carencia de datos.

A través de los datos de caudal medido en Eugui, se observó que los datos no estaban en la misma escala temporal. Es así que, los datos de precipitación estaban registrados con el horario solar mientras que los caudales en el horario oficial. Fue entonces necesario retrasar la hora del caudal, según las variaciones particulares de cada avenida.

Ídem fue necesario en el caso de la transformación de datos de lluvia diario a diezminutal (“*Lluvia equivalente*”), en donde también fue necesario, en este caso, adaptar ambos datos: “*Diario (EMMs) vs 10 min. (EMAs)*”, ya que los datos de las estaciones meteorológicas se recogen por el observador a las 8 horas solares, es decir:

→ **Una hora más (9 horas)** en la hora oficial en horario de invierno.
(Desde el último domingo de octubre hasta el último de marzo)

→ **Dos horas más (10 horas)** en la hora oficial en horario de verano.
(Desde el último domingo de marzo hasta el último de octubre).

La precipitación diaria recogida corresponde a la recogida entre las 8 horas solares del día y las 8 horas solares del día siguiente. Por ejemplo, la precipitación del día 6 de septiembre corresponde al periodo de 8 horas solares del día 6 de septiembre a las 8 horas solares del día 7 de septiembre.

4.3. Determinación del H.E.D.: Separación del flujo base.

En la caracterización de este trabajo se utilizó para determinar el hidrograma de escorrentía directa (H.E.D.) el método de separación del flujo base del algoritmo de K. Eckhardt (2005). El algoritmo de Eckhardt, es un método biparamétrico que introduce en el parámetro adicional una componente de aproximación hidrológica e hidrogeológica, dotando así a la ecuación de un mayor significado físico.

K. Eckhardt (2005) propuso un filtro de dos parámetros cuya expresión es:

$$q_i = \frac{(1 - BFI_{Max})}{1 - a BFI_{Max}} [Q_i - a(Q_{i-1} - q_{i-1})] \quad ; \quad q_i \geq 0 \quad (14)$$

En donde:

- q_i → Escorrentía directa en el instante i .
- Q_i → Escorrentía total en el instante i .
- a → Constante de recesión del flujo subterráneo.
- BFI_{Max} → Índice del flujo subterráneo.

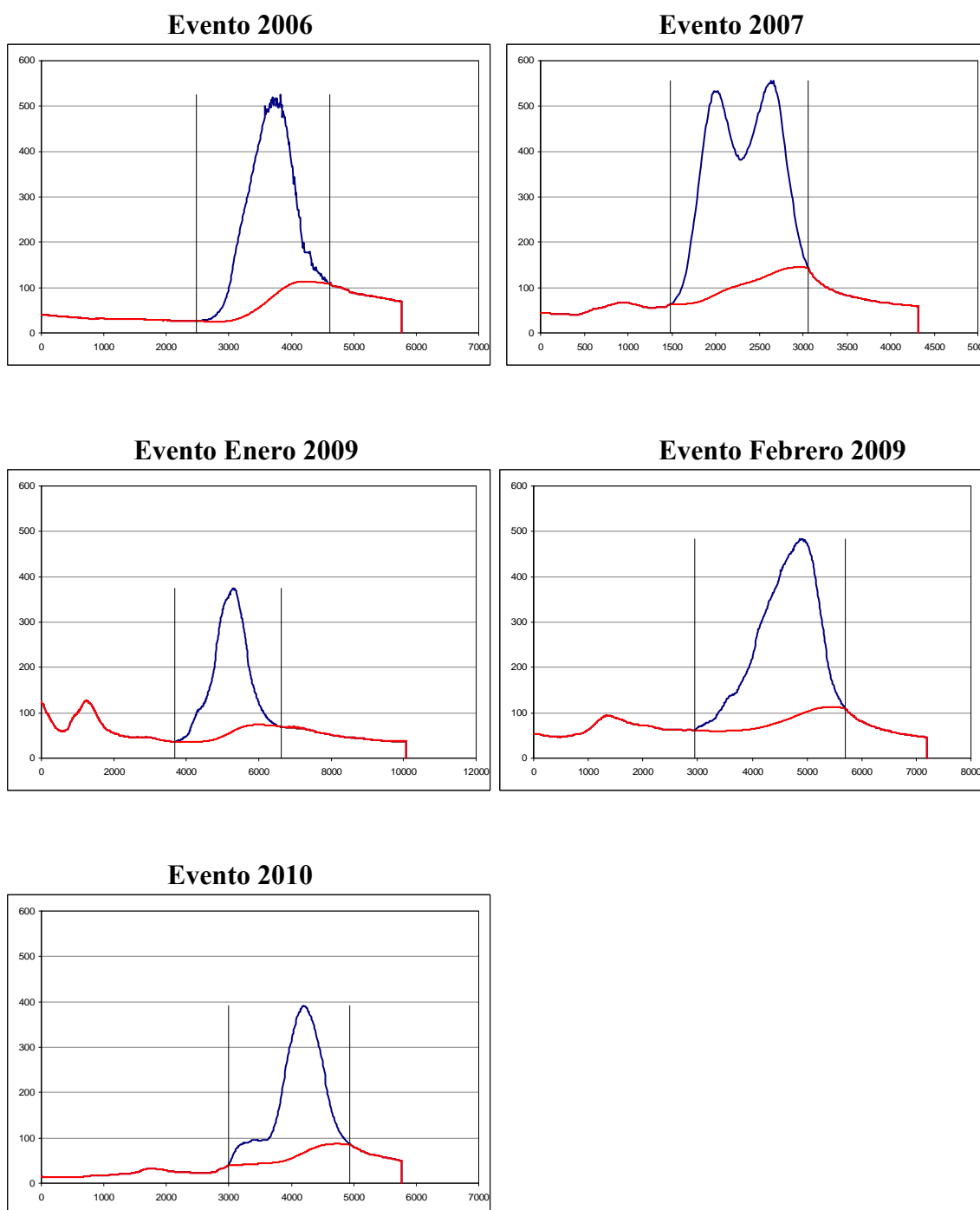


Figura 31.- Los hidrogramas de separación de flujo base para Arazuri.

El tratamiento de los datos y resultados realizados sobre la separación del flujo base se han precisado en el Anexo III sobre la “Separación de flujo base” y para el cual se realizó mediante la utilización de la una hoja de cálculo en *Microsoft Excel* realizada por Mikel Goñi Garatea, del Departamento de Hidrología del área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural de la Universidad Pública de Navarra

4.4. Análisis de la distribución espacial de las precipitaciones.

En la modelización de eventos no es necesario que los parámetros asuman valores iguales. Además, durante el tratamiento de cada avenida, tienen que ser estimadas las condiciones de humedad antecedente (particulares según las condiciones iniciales del sistema real). Es, por tanto fundamental el estudio previo de la distribución de las precipitaciones anteriores y propias del evento considerado.

Las condiciones de humedad antecedente (*Antecedent Moisture Condition* - AMC) se refieren a la capacidad del suelo de absorber la lluvia caída durante el evento, o bien su capacidad de producir escorrentía superficial. Normalmente los valores de AMC se encuentran entre 1 y 3, aunque en la teoría lleguen hasta 4.

Cuando se tratan avenidas extraordinarias, sobre todo en periodos del año en los que las precipitaciones suelen ser abundantes, la elección tiene que realizarse a través de las tablas de AMC 3. Las avenidas utilizadas en este modelo pertenecen a este tipo. Sin embargo, inicialmente se utilizaron las tablas correspondientes a las condiciones de humedad antecedente 2, pero teniendo en cuenta que esta asignación de tablas debería ser reconsiderada luego como parte de la calibración del modelo.

Como se preveía, las condiciones de humedad antecedente eran extremas, salvo alguna pequeña excepción. Por eso, para cada avenida se han debido estimar sus propias condiciones de humedad antecedente, particulares según las condiciones iniciales del sistema real, lo que implica a su vez la modificación del número de curva (CN) para cada subcuenca dada la relación entre ambos parámetros. En la siguiente tabla se muestra el CN propio de cada evento.

SUBCUENCA	CN Medio	CN 2006	CN 2007	CN 2009 Ene	CN 2009 Feb	CN 2010
R10W10	69	84	74	84	84	84
R20W20	69	84	69	84	84	80
R30W30	85	93	86	93	93	88
R40W40	85	93	93	93	93	85
R50W50	85	93	90	93	93	88
R60W60	62	79	79	79	79	74
R170W70	65	81	81	81	81	81
R120W80	64	81	81	81	81	74
R150W90	66	82	82	82	82	82
R410W100	62	79	78	79	79	79
R440W120	80	90	79	90	90	71
R310W130	81	89	71	91	89	70
R340W140	78	84	78	89	89	75
R290W150	76	86	74	88	86	74
R370W160	73	74	85	86	86	83
R350W170	70	70	84	84	84	79
R390W180	61	78	78	78	78	76
R420W190	81	91	81	91	91	69

Tabla 9.- Los valores de CN utilizando todas las estaciones y propios para cada evento.

Resulta así fundamental reconsiderar la asignación realizada, después de un estudio de la distribución de las precipitaciones ocurridas durante el evento considerado. Para caracterizar los eventos de lluvia estudiados e inmediatamente anteriores a los mismos, se han visualizado y comparado los pluviogramas producidos por parte de las estaciones diezminutales utilizadas en el modelo.

En la figura siguiente se muestran los días de máxima precipitación para cada uno de los eventos seleccionados:

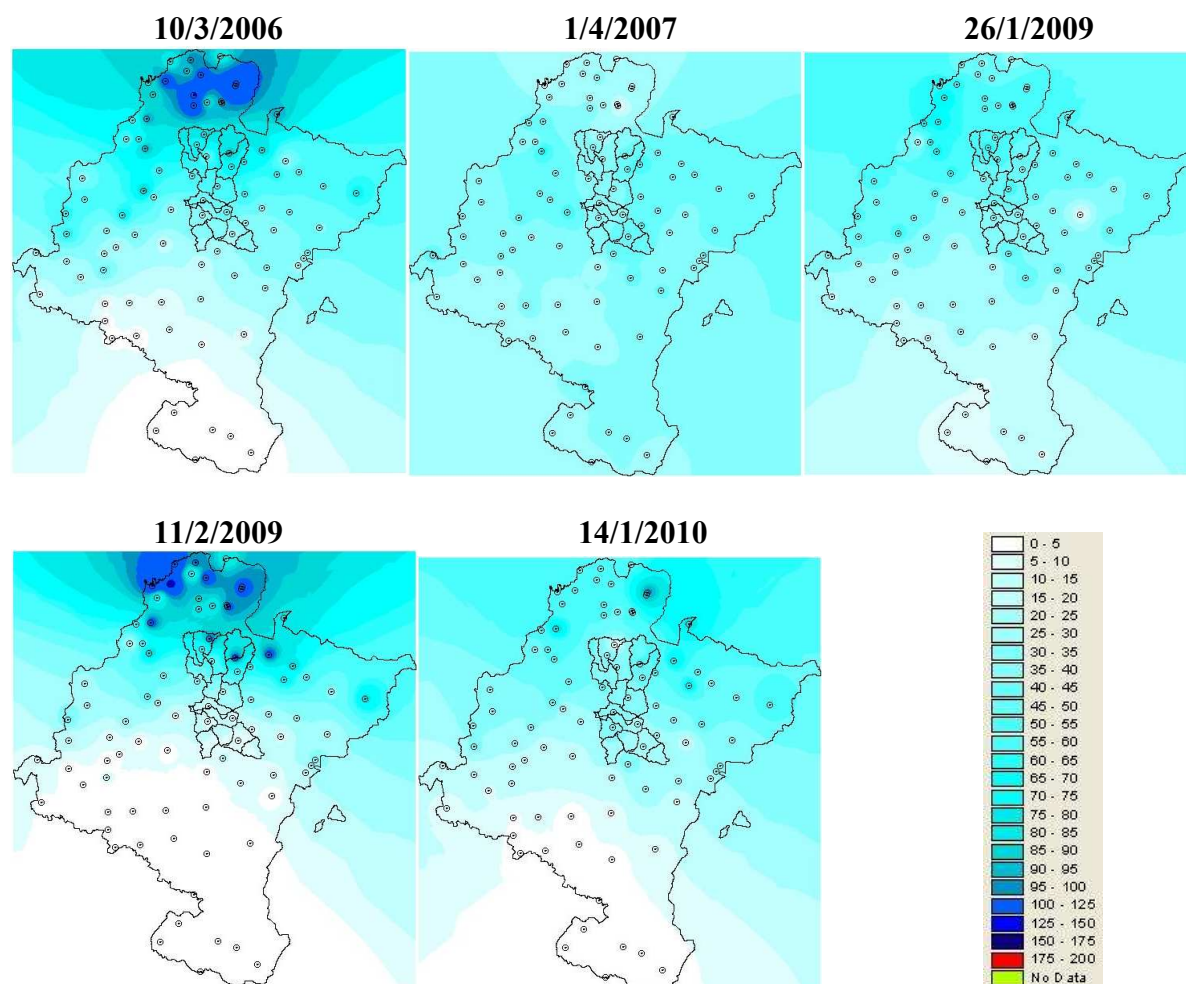


Figura 32.- Los mapas de máxima precipitación para cada evento.

El Anexo IV; “Análisis de la distribución espacial de las precipitaciones”, se recoge de forma más minuciosa lo citado.

4.5. La lluvia equivalente.

A la hora de introducir los datos de las estaciones meteorológicas al modelo hidrológico HEC-HMS, nos encontramos con que tenemos dos formas diferentes en cuanto a la temporalidad de los datos que nos ofrecen dichas estaciones meteorológicas: las EMMs únicamente nos proporciona el dato total del día (Dato diario), mientras que las EMAs nos ofrecen datos cada 10 minutos (Dato diezminutal), a excepción de la estación de Arazuri que ofrece datos cada 30 minutos. Además, a eso, se le debería de sumar que en el caso de no introducir datos de las EMMs estamos perdiendo información y teniendo una peor caracterización de la cuenca.

Lógicamente, el tener datos diezminutales ofrece la posibilidad de tener caracterizado con mayor precisión el evento. Sin embargo, geográficamente las estaciones automáticas son escasas en la zona de estudio e incluso en aquellas partes con mayor índice de lluvia, son nulas. Por otro lado, el reparto de las estaciones manuales es más equitativo en la toda la zona de estudio.

Se ha creado entonces la “*lluvia equivalente*”, que ha sido el proceso que han sufrido los datos de lluvia que han sido transformados de dato diario de cada una de las estaciones meteorológicas manuales, a un dato diezminutal, como si de una estación automática se tratara. De este modo y con el fin de poder introducir datos diezminutales en todas las estaciones dentro del modelo hidrológico, se ha realizado dicha transformación, no sin antes, tener en cuenta algunas condiciones como son las siguientes:

- Pese a que la lluvia no es igual en toda la zona de estudio, se puede caracterizar en función de los datos de lluvia acumulada de todas las estaciones, por lo que se puede estimar de forma proporcional y ponderada el dato diezminutal de una estación manual a partir de dos o más estaciones automáticas.
- La ponderación a partir de las estaciones automáticas será en función de la distancia métrica en línea recta desde dichas estaciones automáticas a la estación manual en conversión y será un valor entre 0 y 1. Lógicamente, cuanto más cerca esté una estación automática de la estación manual a la que se quiere fragmentar su precipitación acumulada en datos diezminutales, mayor número de ponderación tendrá y más se acercará a 1, y viceversa.
- El sumatorio de los datos diezminutales deberá ser, obviamente, igual al dato de lluvia acumulada de dicha estación manual.

Todo esto se resume en una fórmula matemática:

$$\text{Dato diezminutal ficticio} = \sum_1^n \left[(DD_{EMA\ n} * \frac{Pa_{EMM}}{Pa_{EMA\ n}}) * Cp_n \right] \quad (15)$$

En donde:

- $DD_{EMA\ n}$ → Es el dato diezminutal de la EMA.
- Pa_{EMM} → Es la precipitación acumulada de la EMM.
- $Pa_{EMA\ n}$ → Es la precipitación acumulada de la EMA.
- Cp_n → Es la coeficiente de ponderación de la EMA.

Así de este modo, se ha tomado las siguientes referencias de estaciones manuales y ponderaciones para cada estación manual:

BELATE	
Est. Met. Automáticas	Ponderación
Doneztebe	0.45
Oskotz	0.55

BELZUNCE	
Est. Met. Automáticas	Ponderación
Oskotz	0.55
Pamplona – Larrabide	0.45

ERRO	
Est. Met. Automáticas	Ponderación
Roncesvalles	0.56
Beortegi	0.44

EUGUI	
Est. Met. Automáticas	Ponderación
Doneztebe	0.28
Oskotz	0.34
Roncesvalles	0.38

IRAIZOZ	
Est. Met. Automáticas	Ponderación
Doneztebe	0.39
Oskotz	0.61

IROTZ	
Est. Met. Automáticas	Ponderación
Pamplona – Larrabide	0.47
Oskotz	0.20
Beortegi	0.33

MONREAL	
Est. Met. Automáticas	Ponderación
Ilundáin	0.40
Getadar	0.33 (0.54)
Beortegi	0.27 (0.46)

OLAGÜE	
Est. Met. Automáticas	Ponderación
Doneztebe	0.35
Oskotz	0.45
Roncesvalles	0.20

ZALBA	
Est. Met. Automáticas	Ponderación
Roncesvalles	0.16
Beortegi	0.84

ZUAZU	
Est. Met. Automáticas	Ponderación
Ilundáin	0.28
Getadar	0.24 (0.33)
Beortegi	0.48 (0.67)

ZUBIRI	
Est. Met. Automáticas	Ponderación
Roncesvalles	0.39
Oskotz	0.29
Beortegi	0.32

NOTA: A partir del año 2009 no hay datos de la EMA de Ilundáin, por lo que el coeficiente se modificó; Valores entre paréntesis.

Tabla 10.- Valores de ponderación para cada EMM.

4.6. Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad ha sido fundamental para comprobar la tasa de dependencia de la buena aproximación del modelo con respecto a los parámetros más importantes. Este análisis, fue realizado como parte del trabajo final de carrera (TFC) de Scaini, Anna, (2007) en su *Simulación hidrológica de la cuenca del río Arga mediante la utilización de HEC-HMS*, y del cual ha sido obtenido ya que las condiciones del estudio y los parámetros y métodos utilizados han sido los mismos que los realizados en este estudio.

El análisis se realizó simulando la avenida de 2006, ocurrida entre el día 10 y el día 13 de marzo, según variaciones por separado de los parámetros número de curva (CN), pérdidas iniciales (I_a), tiempo de tránsito (K de Muskingum) y tiempo de desfase (T_l), de manera que se pudo comprobar cuanto quedaba afectado por su variación el caudal producido.

El análisis de sensibilidad se realizó basándose en el coeficiente de sensibilidad, S , descrito por Nearing *et al.* (1989):

$$S = \left| \frac{(O_{Max} - O_{Min})/O_{Med}}{(I_{Max} - I_{Min})/I_{Med}} \right| \quad (16)$$

En donde:

- $I_{Máx,}$ → El valor máximo de la variable de entrada.
- $I_{Mín,}$ → El valor mínimo de la variable de entrada.
- $I_{Med,}$ → El valor medio de la variable de entrada.
- $O_{Máx,}$ → El valor máximo de salida de la variable asociada.
- $O_{Mín,}$ → El valor mínimo de salida de la variable asociada.
- $O_{Med,}$ → El valor medio de salida de la variable asociada.

Los valores medios de S muy cercanos a 1 indican un incremento muy similar de las dos distribuciones de valores.

El número de curva (CN).

El análisis de sensibilidad del parámetro del número de curva o CN se realizó utilizando intervalos de valores de los números de curva medios de toda la cuenca, para averiguar las variaciones tanto en el caudal producido como en los tiempos de partida de la curva de caudal. Se ha implementado cada CN medio subiéndolo de una forma porcentual relativa. Todos los CN medios tuvieron que ser subidos de la misma manera, para que se pudiera analizar correctamente el resultado. Como algunos de los CN medios, ya por sí mismos, resultan muy elevados, se optó por subir porcentualmente la fracción que falta a cada valor de CN medio para llegar al valor máximo (100). De esta forma se calculó la diferencia entre el valor medio de partida y el valor 100, sumando las variaciones porcentuales de 10% hasta 90% de esta fracción al valor de partida mismo. Una vez calculados los CN correspondientes a las variaciones porcentuales, se cargaron los valores en el modelo, manteniendo los demás parámetros invariados, realizándose una nueva simulación. Los hidrogramas de caudal producido al punto de salida de la cuenca se han superpuesto en un gráfico único para poder ser analizados. (Fig. 33).

Las pérdidas iniciales (I_a).

Las pérdidas iniciales, I_a , miden la cantidad de precipitación que no produce escurrimiento al inicio de la tormenta. En condiciones normales, I_a se puede considerar como el 20% de las pérdidas potenciales máximas ($I_a=0,2 S$). El valor de S depende directamente del CN, entonces lo que es interesante comprobar es la sensibilidad del modelo en respecto a la variación del parámetro K . Cuando se trata de avenidas extraordinarias las condiciones iniciales del suelo son críticas, de ahí que la fracción de precipitación que produce escurrimiento suele ser más elevada.

El análisis de sensibilidad para este parámetro se realizó para los valores de 20%, 10% y 5%. Una vez implementado el modelo según estos valores, teniendo fijos todos los demás parámetros, se ha averiguado las diferencias entre las curvas de caudal producido al punto de salida. (Fig. 33).

El tiempo de tránsito (K).

El análisis de sensibilidad del parámetro tiempo de tránsito de Muskingum se realizó para averiguar las variaciones que los tiempos de tránsito provocan en la formación del caudal. Dejando todos los demás parámetros fijados, se subieron y bajaron los tiempos de tránsito de un intervalo de media hora. (Fig. 33).

El tiempo de desfase (T_l).

El tiempo de desfase, parámetro del método del hidrograma adimensional del SCS, se estimó utilizando la función *CN Lag Method* (NRCS, 2004). Estimando la pendiente de cada subcuenca y utilizando la fórmula de Víctor Mockus del método del número de curva para, se llevó a cabo el cálculo del T_l en horas de cada subcuenca:

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{2.92Y^{0.5}} \quad (17)$$

En donde:

- T_{lag} → Lag Time de la subcuenca, en horas.
- L → Largura fluvial hasta la divisoria, en kilómetros.
- CN → Número de Curva medio de la subcuenca.
- Y → Pendiente fluvial, en %.

Por el parámetro T_l también se hizo un análisis de sensibilidad para averiguar la variación que provoca en el hidrograma de caudal. Siempre dejando los demás parámetros fijados, se subieron y bajaron los tiempos de desfase según intervalos porcentuales. La visualización gráfica de los hidrogramas de caudal ayuda a entender las consecuencias de la variación de los parámetros analizados. (Fig. 33).

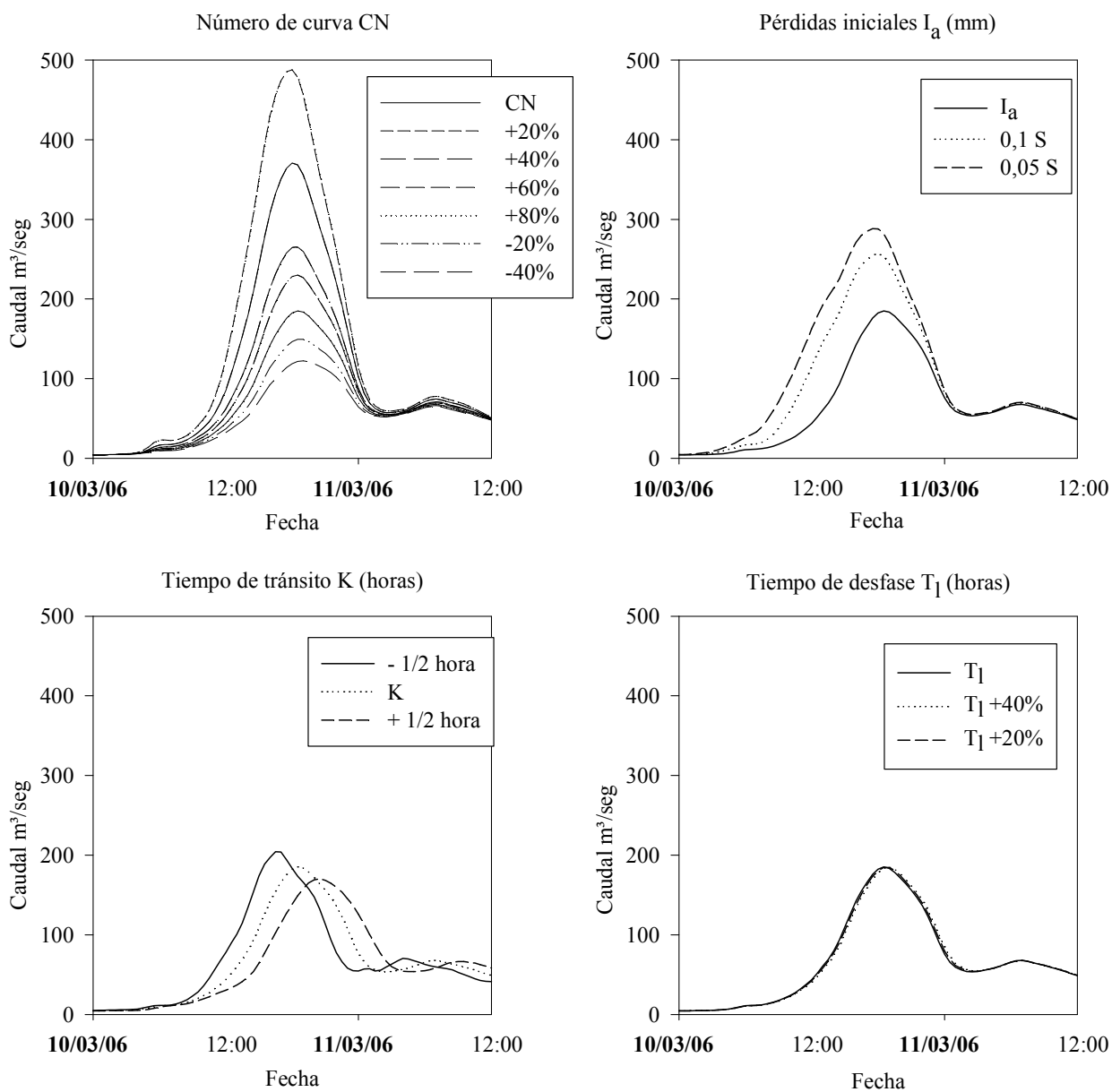


Figura 33.- Análisis de sensibilidad.

(Fuente: Universidad Pública de Navarra).

Ya sólo por vía gráfica se puede notar que la tasa de variación del tiempo de desfase es mucho menor en comparación con los otros parámetros analizados. Es decir que una variación porcentual pequeña de dicho parámetro no provoca variación apreciable en la gráfica de caudal. En la siguiente tabla se muestra el cálculo de las variaciones entre ellos en términos de caudal y horario del pico de la avenida.

Parámetro	Variaciones parámetro	Valor medio	Tiempo al pico (Hora)	Caudal al pico (m ³ /seg.)
Número de Curva <i>CN</i>	Menos 40%	57	12:30	122,5
	Menos 20%	63	12:00	149,5
	inicial	71	12:00	185,1
	20%	76	12:00	230,1
	40%	82	12:00	265,3
	60%	88	11:30	370,8
	80%	94	11:30	487,7
Pérdidas Iniciales <i>I_a</i> (mm)	0,2 S	22.9	12:00	185.1
	0,1 S	11.5	11:30	256.6
	0,05 S	5.7	11:00	288.3
Tiempo de tránsito <i>K</i> (Horas)	Menos 1/2 hora	1.2	10:00	204,3
	K	1.7	12:00	185,1
	Más media hora	2.2	14:00	170,1
Tiempo de desfase <i>T_i</i> (Horas)	<i>T_i</i>	21.3	12:00	185.1
	Más 20%	25.6	12:00	184.5
	Más 40%	29.9	12:30	184.8

Tabla 11.- Análisis de las curvas de caudal.

(Fuente: Universidad Pública de Navarra).

El número de curva es el parámetro más importante teniendo en cuenta el volumen de caudal producido por parte de la avenida. Una variación porcentual pequeña de este parámetro genera una importante subida o bajada del caudal. Los tiempos del caudal de pico vienen afectados aunque con menor relevancia. Por las pérdidas iniciales el asunto fundamental es la anticipación de la subida de la curva de avenida. La bajada de las pérdidas iniciales hace que el aporte de la lluvia caída se transforme subidamente en escorrentía, de ahí que el hidrograma de caudal resulte anticipado. El tiempo de pico cambia menos sensiblemente ya que hay una anticipación de media hora entre cada uno de los tres valores. Por otro lado, menor es el valor de las pérdidas iniciales, mayor es la aportación de la lluvia a la formación de caudal. Eso explica la rápida subida del caudal de pico en cuanto el valor de las pérdidas iniciales baje. Por el parámetro *K*, es evidente que la anticipación o retardo de dicho tiempo provoque una consecuente anticipación o retardo en la subida de la curva de caudal y en el caudal de pico. Es interesante también el hecho de que al aumentar la velocidad de tránsito del agua a lo largo del cauce, aumentan también, proporcionalmente, el caudal total y el de pico. Es decir, hay una mayor cantidad de agua que llega al punto de salida al mismo tiempo.

Para analizar en forma conjunta la respuesta del modelo a la variación de los parámetros analizados se ha aplicado la formula del coeficiente de sensibilidad de Nearing. Calculad el porcentaje de las variaciones entre ellos, por parejas, se han utilizado los valores obtenidos para calcular el coeficiente de sensibilidad, mostrado en la tabla siguiente (Tabla 12). Se han omitido los resultados obtenidos por el *T_i* ya que los valores del coeficiente de Nearing eran muy próximos a cero.

Parámetros	Variaciones parámetros	Nearing
Número de curva <i>CN</i>	2	1,99
	-20/inicial	1,78
	Inicial/-20	3,19
	20/40	1,87
	40/60	4,70
	60/80	4,13
Pérdidas iniciales <i>I_a</i> (mm)	0,2 - 0,1	2,06
	0,1 -0,05	4,28
Tiempo de tránsito <i>K</i> (horas)	Inicial/- media hora	3.45
	Inicial/+ media hora	3.08

Tabla 12.- Análisis de los parámetros mediante Nearing.

(Fuente: Universidad Pública de Navarra).

4.7. Aplicación y análisis del modelo.

Con los pocos eventos que han podido ser seleccionados para realizar este estudio; Un total de 5 eventos, no se puede aplicar una validación y calibración rigurosa al modelo, motivo por el cual se han omitido ambas partes en este estudio.

Ajustes y Desfases.

Si que se han realizado algunas modificaciones a la hora de presentar los resultados, como ha sido el ajuste horario entre las estaciones de medida citadas en el apartado 4.2 “Análisis de la correspondencia entre datos” o como ha sido también el ajuste del desfase existente entre el punto de medición real de aforo con respecto al punto de medición de simulación para el caso de Olave en el río Ulzama y para San Jorge en el río Arga.

Para poder estimar este desfase, se ha medido la distancia existente desde el punto de medida en HEC-HMS hasta la localización de la estación de aforo. En primer lugar se ha cargado los archivos *Cuenca_de_estudio.shp*, *Estaciones_aforo.shp* y *Ríos_zona.shp* en *ArcView*, y mediante la utilización del comando de medición de distancias añadiendo una nueva columna en la tabla de atributos, el programa nos da la medición de cada tramo de río.

Posteriormente, una vez conocida la distancia y exportados los datos a una hoja de cálculo en *Microsoft Excel*, se ha calculado el desfase temporal, poniendo como dato de partida que el agua circula a una velocidad media de 1 metro por segundo.

Finalmente, como el dato temporal viene expresado hasta en segundos, se ha redondeado al alza hasta la fracción diezminutal siguiente para que pueda hacerse coincidir con los datos de salida del modelo hidrológico. (Tabla 13).

5. RESULTADOS

Una vez que se ha tenido el modelo hidrológico a punto y realizado las correspondientes simulaciones, se han representado los resultados obtenidos de los cinco eventos seleccionados, extrayendo los datos del propio HEC-HMS y utilizando un programa específico para representar dichos gráficos con una alta calidad, como es **SigmaPlot**.



Figura 35.- Icono del programa SigmaPlot.

SigmaPlot.

El programa SigmaPlot es un software informático destinado a realizar representaciones gráficas y análisis científicos de paquetes de datos que permiten la creación de gráficos. Este software, que fue desarrollado por *Jandel Corporation* y actualmente es gestionado por *Systat Software Inc.* tras una fusión previa con *SPSS Inc.* en 1996, puede leer múltiples formatos, como es por ejemplo *Microsoft Excel*, y también puede llevar a cabo transformaciones matemáticas y análisis estadísticos. En este estudio, se ha utilizado la versión 10.0, aunque existen otras versiones algo más actualizadas 11.X.0.

5.1. Resultados; Con sólo EMAs versus Con todas las EM.

En un primer momento, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos a partir de realizar dos simulaciones, ambas con mismos parámetros a excepción de la división areal de cuenca en función de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Para la primera simulación (Caso 1), se realizó la simulación teniendo en cuenta únicamente las EMAs existentes en la cuenca o en sus proximidades, mientras que para la segunda simulación (Caso 2), se tuvieron en consideración tanto las EMAs como las EMMs.

Los resultados obtenidos para el “*Punto de Salida*” (Arazuri), que es el punto de referencia para la cuenca, se pueden observar en la Figura 36, situada en la siguiente página. Hay que notificar que para la realización de estos gráficos, no se ha realizado ningún ajuste de los comentados en el apartado 4.7. “*Aplicación y análisis del modelo*”.

Como se puede observar, a excepción del evento de 2007, en donde las diferencias apenas son significativas entre ambas simulaciones, en el resto de los cuatro eventos, las simulaciones realizadas con sólo las EMAs se alejan más de lo que es la realidad (Observado) que las simulaciones en donde se ha utilizado todas las estaciones meteorológicas posibles, es decir, tanto EMAs como EMMs. En algunos casos es por defecto, como se aprecia claramente en los eventos de 2009 Febrero o evento de 2010, y otras es por exceso, como se observa en el evento de 2009 Enero o en el evento de 2006. En vista de que la utilización únicamente de EMAs, supone una pérdida de información, partir de este momento, las simulaciones posteriores se realizarán utilizando los datos de todas las estaciones meteorológicas posibles.

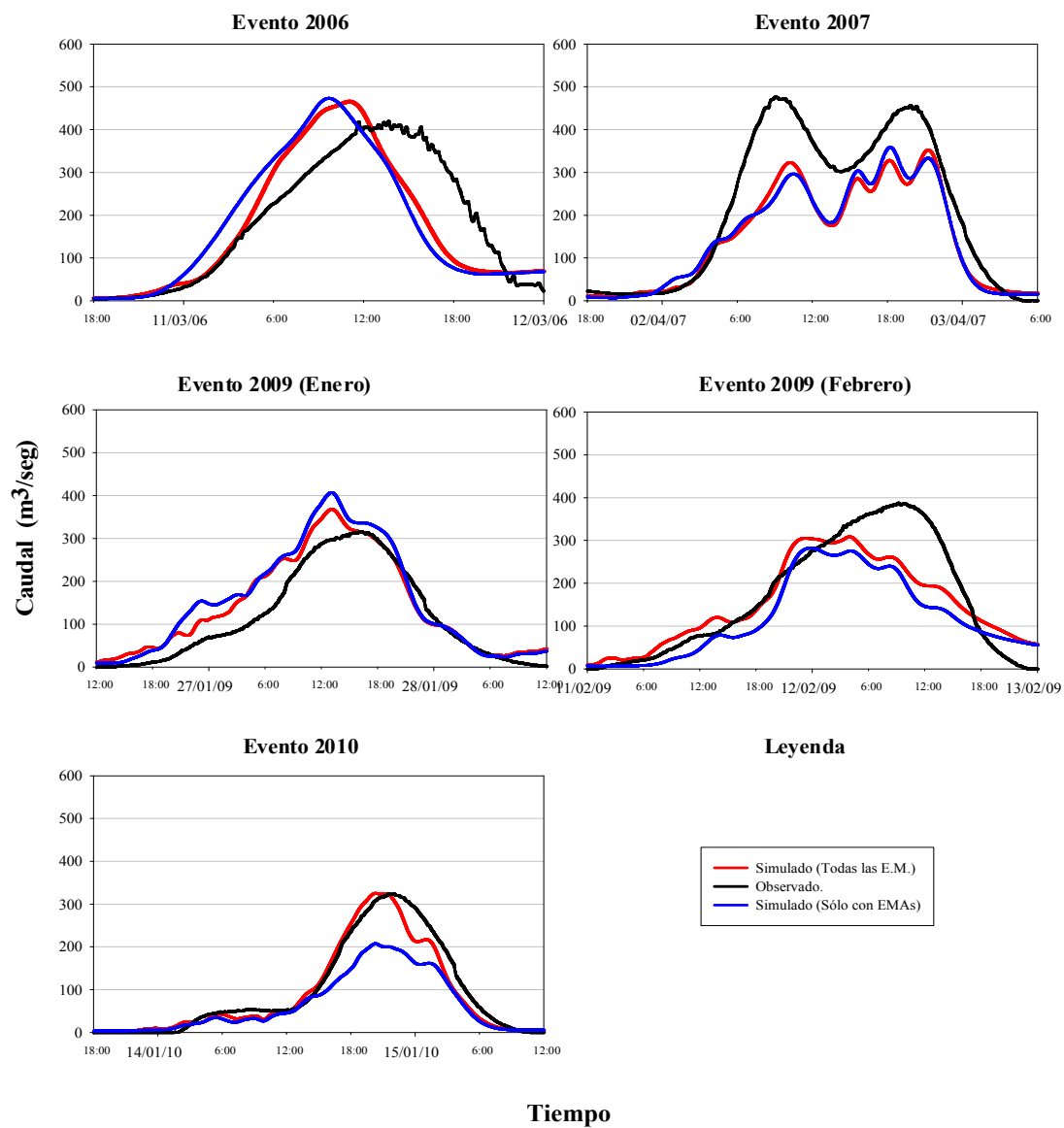


Figura 36.- Gráficos con los resultados de las dos simulaciones *Caso 1* frente al *Caso 2* para el “Punto de Salida” (Arazuri).

5.2. Resultados; *Con Eugui* versus *Sin Eugui*.

En un segundo momento, y una vez decida la utilización de la máxima cantidad de datos posibles en cuanto a las estaciones meteorológicas se refiere, se volvieron a realizar las correspondientes simulaciones para cada evento, esta vez, teniendo en cuenta la subcuenca asociada al embalse de Eugui, o suponiendo que dicha subcuenca no tiene aportación alguna, es decir, la aportación desde el pantano es nula, considerando en ese caso que el caudal que vierte dicha infraestructura es un como un flujo base y que lo único que hace dicho caudal aportado es propagarse a lo largo de la cuenca.

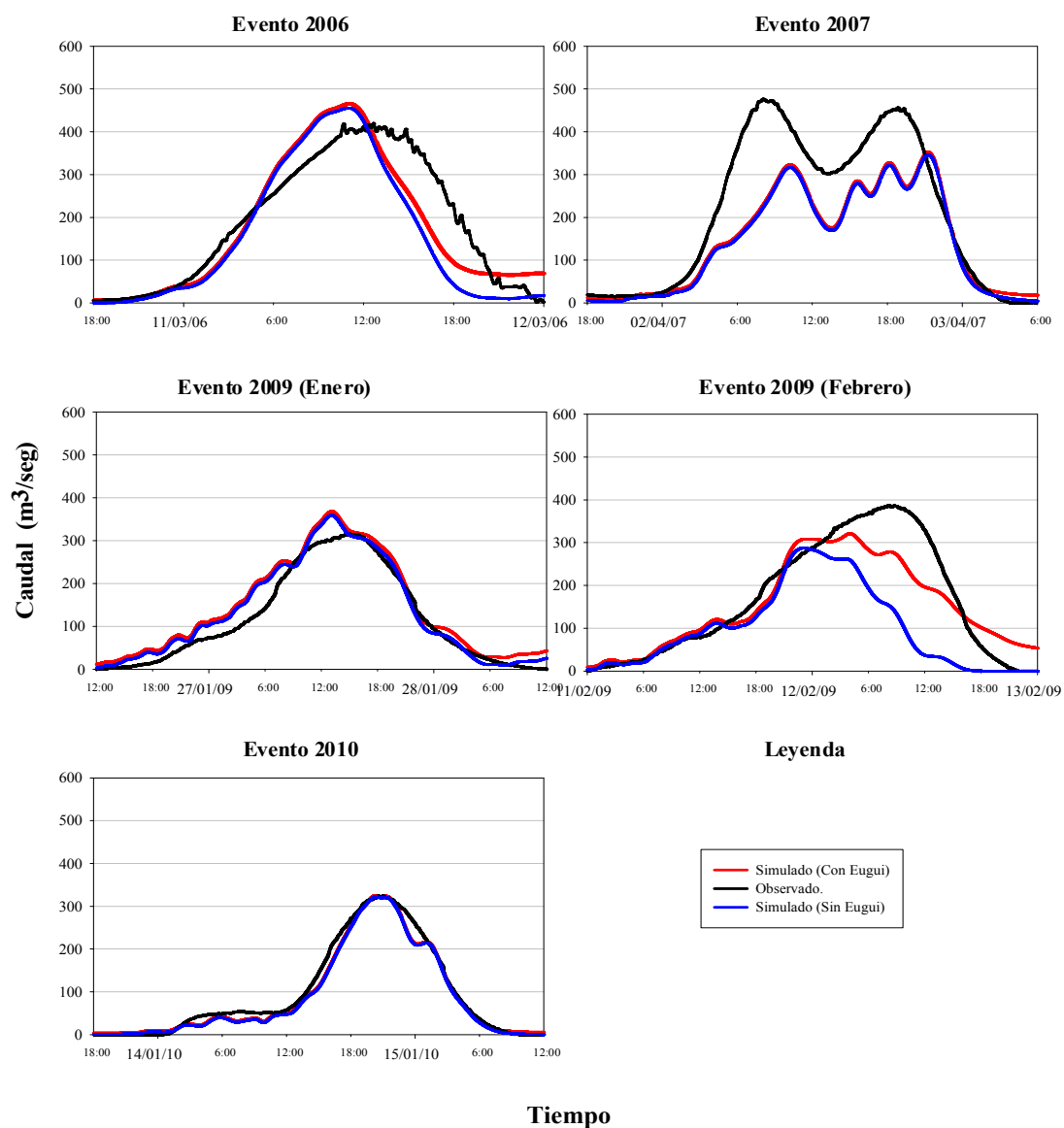


Figura 37.- Gráficos con los resultados de las dos simulaciones *Con Eugui* frente a *Sin Eugui* para el “Punto de Salida” (Arazuri).

A la vista de los resultados de la figura de la página anterior (Fig. 37), se puede afirmar que en todos los eventos estudiados, la aportación del embalse de Eugui es un flujo base para el resto de las mediciones en las estaciones de aforo, es decir, un flujo que se transmite a lo largo de la cuenca sin mayor trámite, salvo la excepción del evento de 2009 Febrero.

En este evento de febrero de 2009, el embalse de Eugui no tiene un comportamiento habitual, por lo que debe de ser considerado como un flujo independiente que sí que afecta al comportamiento general de la cuenca.

Tanto en estas simulaciones, como en las que se realizan posteriormente como resultados definitivos, hay que destacar que ya sí que se tuvo en cuenta aquellos desfases existentes entre el punto simulado en modelo HEC-HMS y la estación de aforo de medición, detallados ampliamente en el apartado 4.7. “Aplicación y análisis del modelo”, así como la diferencia horaria existente entre los datos de las diferentes estaciones meteorológicas y las estaciones de aforo, que también se cita en el apartado señalado y viene de forma especificada en el apartado 4.2 “Análisis de la correspondencia entre datos”.

En el Anexo V “Resultados”, se pueden observar todos los eventos con las diversas estaciones de aforo intermedias.

5.3. Resultados definitivos.

Una vez valoradas las diversas opciones y variables en el estudio de la cuenca, se han realizados los gráficos definitivos. En la figura de la página siguiente (Fig. 38), se puede observar los gráficos definitivos para el *Punto de Salida – Arazuri*.

Todos los gráficos, correspondientes a cada uno de los cinco eventos para cada una de las seis estaciones de aforo de la cuenca a estudio, se encuentran recogidos en el Anexo V “Resultados”, en el cual se ha incorporado también los mapas de distribución de la lluvia con la finalidad de tener una visualización más gráfica y sencilla de los resultados obtenidos frente a la situación meteorológica real ocurrida.

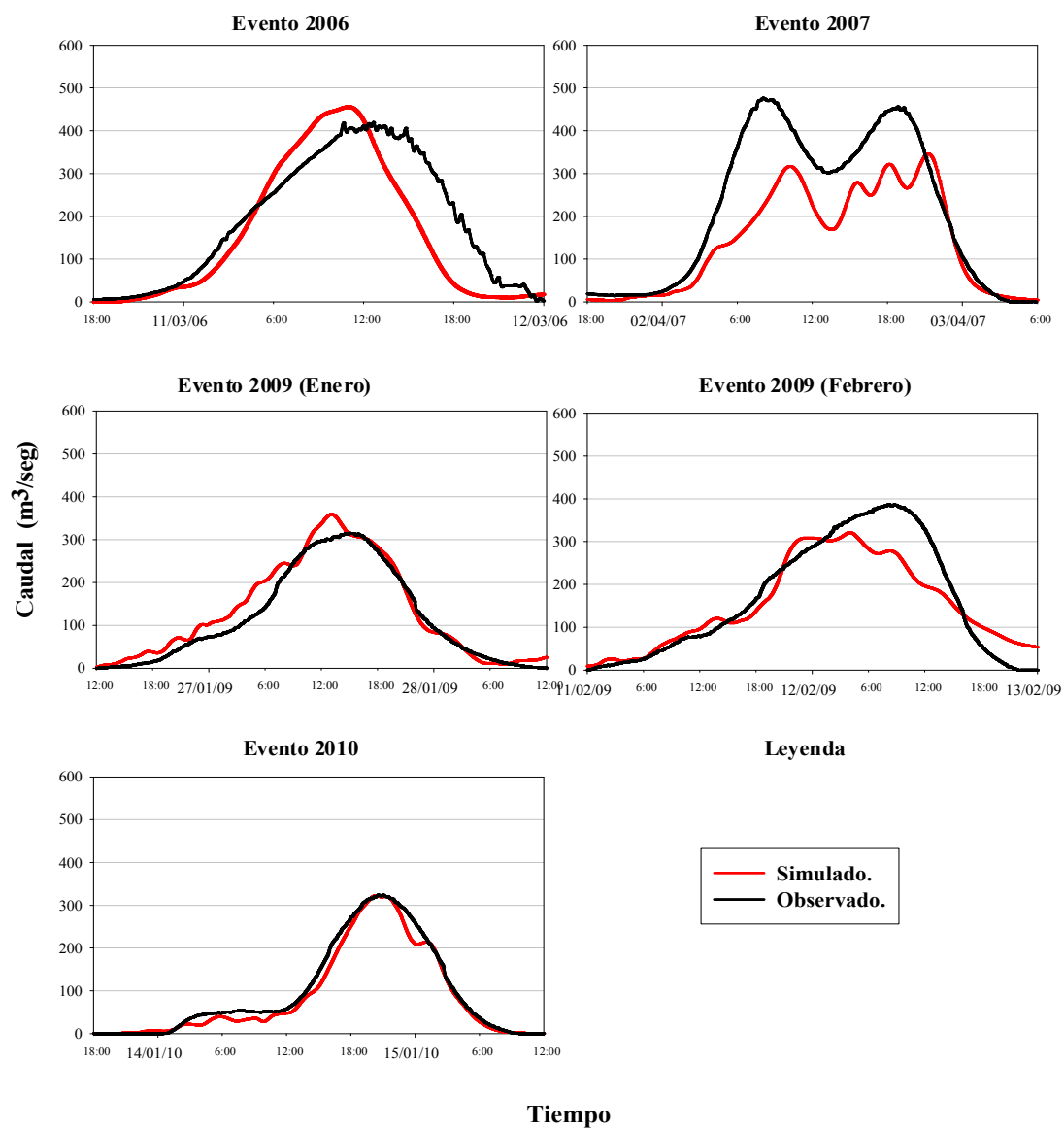


Figura 38.- Gráficos con los resultados definitivos para el “Punto de Salida” (Arazuri).

6. CONCLUSIONES

La realización de este Trabajo Final de Carrera titulado “*Simulación de los episodios de avenida en el río Arga a su paso por Pamplona mediante HEC-HMS*” ha servido para obtener diversas conclusiones, las cuales se exponen a continuación.

En primer lugar, se puede constatar que en las últimas tres décadas, los eventos que han provocado las avenidas más significativas se sitúan entre los meses de diciembre y marzo, es decir, son principalmente avenidas invernales. Pese a que diciembre y enero, son los meses en los que históricamente más eventos se han producido, el carácter irregular de los mismos hace que sin embargo no se pueda afirmar una tendencia en la ocurrencia de este tipo de sucesos.

Estos eventos, se caracterizan en su mayoría por ser lluvias procedentes de un frente de más de un día de duración y de forma más o menos homogénea, aunque con algo más de intensidad en la zona más al norte de la cuenca estudiada. Este frente de lluvias puede estar acompañado de nieve, granizo y/viento o estar precedido de otro frente inmediatamente anterior con dichos efectos meteorológicos.

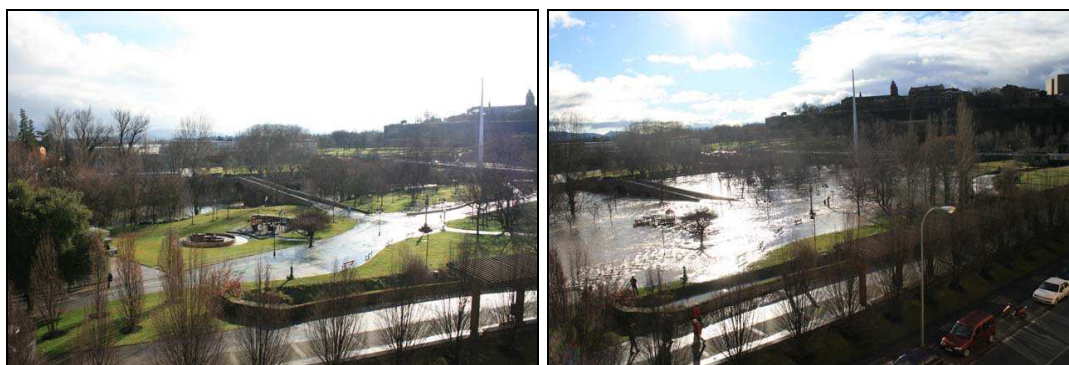


Figura 39.- Fotografías del mismo lugar, el parque de San Pedro en la zona de Aranzadi (Pamplona) en dos situaciones totalmente distintas. Un día normal cualquiera (Izqda.) frente a la situación vivida durante la avenida de febrero de 2009 (Dcha.).

(Fuente: *Diario de Navarra*).

Por último en cuanto a la descripción y caracterización de los eventos, es de destacar también el interés y la importancia que en los últimos años, se le está dando a este tipo de sucesos, por parte de los medios de comunicación, y en concreto por los de prensa escrita, con la publicación de diversas noticias documentadas con situaciones, referencias y daños provocados, e incluso acompañadas dichas noticias con decenas de imágenes fotográficas en lugares variopintos, facilitan la búsqueda de diversos tipos de información y permiten valorar, más si cabe, la magnitud de la avenida por sí misma o en comparación con otras, en función de los llamados ‘*puntos fijos de control*’ o lugares que sirven de referencia. (Figuras 39 y 40).



Figura 40.- Fotografías del puente del parque de La Nogalera de Burlada, en avenidas diferentes: La de febrero de 2009 (Izqda.), la de enero de 2009 (Centro) y la de 2007 (Dcha.).

(Fuente: Diario de Navarra).

Entrando ya en la valoración de las simulaciones y en la cuenca en sí, destaca en primer lugar, tal y como se ha podido constatar, que la introducción de una mayor cantidad de datos de precipitación, es decir, el haber introducido no sólo los datos de las EMAS, sino los datos de todas las estaciones meteorológicas posibles, tanto automáticas como manuales, dándole así un mayor realismo al modelo hidrológico sobre la cantidad de lluvia caída en la cuenca, ha hecho aumentar la precisión del modelo.

De ello también se deduce que existe una falta de caracterización de la cuenca a nivel automático, principalmente en la zona más hacia el norte, que además se asemeja con la zona de mayor importancia en cuanto a precipitaciones se refiere.

Por otro lado, se ha visto que el comportamiento que tiene el embalse de Eugui en la cuenca durante los episodios de avenidas, no tiene apenas relevancia en las mismas salvo que su desembalse sea significativo, como se ha podido concretar en la avenida de febrero de 2009.

Finalmente, y pese a no haberse realizado una calibración y una posterior validación del modelo hidrológico HEC-HMS, por la falta de un número considerable de eventos estudiados que hubiera permitido llevar a cabo lo citado, los parámetros y métodos utilizados en el modelo, aportan unos buenos resultados finales.

Por último y para concluir, sería interesante para poder ampliar el estudio, así como para poder mejorar el modelo hidrológico, realizar la incorporación de más y nuevos eventos, implementar el modelo con más parámetro y funciones como puede ser por ejemplo la opción de incorporar el elemento 'nieve' (*"Snowmelt Method"*) o la utilización de un mayor número de datos a los utilizados, mediante la inclusión datos, de otras o de nuevas, estaciones meteorológicas, estaciones de aforo, pluviómetros, etc... y que no han sido incluidos en este estudio.

7. REFERENCIAS

Área de Proyectos Estratégicos (2000): *Propuesta para la recuperación de los ríos de Pamplona: Arga (II Fase; Elorz y Sadar)*. Fondo de Cohesión, Ayuntamiento de Pamplona.

Ayuntamiento de Pamplona Website. <http://www.pamplona.es/>

Bedient, P.B., Huber, W.C. (1990): *Hydrology and Floodplain Analysis*. Addison-Wesley, Reading. 319.

C.A.N. (1991). *El agua en Navarra*. Caja de Ahorros de Navarra. Pamplona.

Cazorzi F. (1983): *Indagine sul metodo dell'idrogramma unitario del S.C.S.* Quaderni di Idronomia Montana N° 3.

Cazorzi F. (1990): *Real Time Flow Forecasting in the Piave river basin using HEC-I*. F. FAO working party on the management of mountain watersheds. Vicenza.

Centro de estudios hidrográficos del Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEH-CEDEX) Website. <http://hercules.cedex.es/general/default.htm>

Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX) Website. <http://www.cedex.es/>

Chow, V.T., Maidment D.R., Mays L.W., (1994): *Hidrológica aplicada*. McGraw-Hill. Stª Fe de Bogotá.

Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) Website. <http://www.chebro.es/>

Departamento de Obras Públicas, Transporte y Comunicaciones del Gobierno de Navarra Website. <http://www.cfnavarra.es/webgn/sou/instituc/da/departamento/presenta.htm>

Diario de Navarra Website. <http://www.diariodenavarra.es/>

Diario de Noticias Website. <http://www.noticiasdenavarra.com/>

Dirección General de Obras Públicas (2005); *Memoria de 2005. Obras hidráulicas*. Departamento de Obras Públicas, Transporte y Comunicaciones del Gobierno de Navarra. 2, 137-139.

Directiva Marco del Agua (DMA) 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, *por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*.

Eckhardt K. (2005): *How to construct recursive digital filters for baseflow separation*. Wiley Inter Science, Hydrological Processes, 19, 507-515.

Eckhardt K. (2008): *A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods*. Journal of Hydrology, 352, 168-173.

El parque fluvial de Pamplona Website. <http://www.parquefluvialdepamplona.es/>

Environmental Systems Research Institute (ESRI) Support Center. GIS and Mapping Software. Desktop GIS for mapping, Data Integration, Analysis. ESRI. <http://arcsripts.esri.com/>

Geospatial Hydrologic Modeling Extension (2003): *HEC-GeoHMS User's Manual, Version 1.1, December 2003*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

Gerencia de Urbanismo (1998): *Estudio Hidráulico del río Arga en la Comarca de Pamplona*. Ayuntamiento de Pamplona.

Gobierno de Navarra Website. <http://www.navarra.es/>

Goñi Garatea, M. (2009); *Hoja de cálculo de Microsoft Excel para la extracción del flujo base mediante el algoritmo de Eckhardt*. Dpto. de Hidrología. Área de Ingeniería Agroforestal del Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.

Hjelmfelt, A.T., Kramer K.A. y Burwell, R.E. (1981): *Curve Numbers as Random Variables*. Proceedings of International Symposium on Rainfall- Runoff Modeling. Mississippi State University.

Hydrologic Modeling System HEC-HMS (2010): *HEC-HMS Quick Start Guide Version 3.5, August 2010*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, California.

Hydrologic Modeling System HEC-HMS (2010): *HEC-HMS User's Manual Version 3.5, August 2010*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, California.

Hydrologic Modeling System HEC-HMS (2000): *Technical Reference Manual, March 2000*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Davis, California.

Iglesias Marrodán, D. (2008): *Estudio de los sucesos extraordinarios de lluvia y sus efectos en la cuenca del río Argá*. Trabajo Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Pública de Navarra.

Infraestructura de datos espaciales de Navarra (IDENA) Website. <http://idena.navarra.es/>

Instituto Geológico y Minero de España Website. <http://www.igme.es/>

Instituto Nacional de Estadística (INE) Website. <http://www.ine.es/>

Iñiguez, J. *et al.* 1982-1992. *Mapa de Suelos de Navarra, escala 1: 50.000*. Departamento de Edafología. Universidad de Navarra. Pamplona.

Llamas, J. (1993). *Hidrología General: Principios y aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco – Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV-EHU).

Ministerio del Medio Ambiente, Rural y Marino (MARM) Website. <http://www.marm.es/>

M.M.A. (2000); *Libro blanco del Agua en España*. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica. Madrid.

M.O.P.U., 1990. Instrucción 5.2-I.C. *Drenaje superficial*. Dirección General de Carreteras. Madrid.

Moreno Colás, M.C. y García Vera, M.A. (2000): *Los aprovechamientos en la Cuenca del Ebro: Afección en el régimen hidrológico fluvial*, Zaragoza. Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General de obras hidráulicas y calidad de las aguas, Oficina de planificación hidrológica, 11-13.

Navarro, J.A. (1993). *Análisis del modelo de escorrentía HEC-1. Aplicación a la cuenca del arrollo salado se Lanjarón*. Trabajo Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad de Córdoba.

Nearing, M.A., L.D. Ascough and H.M.L. Chaves, (1989); *WEPP model sensitivity analysis*. WEPP-USDA Water Erosion Prediction Project. USDA-ARS-NSERL, 2, 14.1-14.33.

NRCS (2004): *National Engineering Handbook*. National Resources Conservations Service. United States Department of Agriculture.

Ponce, V.M. (1989): *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall. New Jersey.

Riegos de Navarra S.A. Website. <http://www.riegosdenavarra.com/>

Scaini, A. (2007): *Simulación hidrológica de la cuenca del río Arga mediante la utilización de HEC-HMS – Simulazione idrologica del bacino del rio Arga mediante l'utilizzo di HEC-HMS*. Trabajo Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Pública de Navarra.

Seco Meneses, A. (1996). *Caracterización hidrológica del río Arga a su paso por Pamplona*. Trabajo Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Pública de Navarra.

Servicio Meteorología y Climatología de Navarra Website. <http://meteo.navarra.es/>

Sistema automático de información hidrológica de la cuenca hidrográfica del Ebro (SAIH Ebro) Website. <http://www.saihebro.com/>

SigmaPlot: Exact Graphs and Data Analysis. Systat Software, Inc. San José, California.
<http://www.sigmaplot.com/>

Sistema de información territorial de Navarra (SITNA) Website. <http://sitna.navarra.es/navegar/>

Soil Survey Division Staff (1993): *Soil Survey Manual*. Soil Conservation Service. United States Department of Agriculture (U.S.D.A.), Agricultural Research Administration.

Témez, J.R. (1987): *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Dirección General de Carreteras. M.O.P.U. Madrid.

U.S. Army Corps of Engineers (1990): *HEC-1 Flood Hydrograph. Package, User's Manual*. Hydrologic Engineering Center. Davis, California.

United States Department of Agriculture, Forest Service (1959): *Forest and Range Hydrology Handbook*. Washington D.C.

United States Department of Agriculture, Forest Service (1959): *Handbook on Methods of Hydrology Analysis*. Washington D.C.

Viessman, W. y Lewis, G.L. (1996): *Introduction to Hydrology*. Harper Collins. New York.

8. AGRADECIMIENTOS

La realización de este Trabajo Final de Carrera no hubiera sido posible sin la estimable colaboración de las siguientes personas y entidades:

A D. **José Javier López Rodríguez**, tutor del T.F.C. y profesor titular del área de Ingeniería Agroforestal del Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural de la UPNA.

A D. **Mikel Goñi Garatea**, profesor del área de Ingeniería Agroforestal del Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural de la UPNA

Al propio **Departamento de Hidrología** del área de Ingeniería Agroforestal del Dpto. de Proyectos e Ingeniería Rural de la UPNA, y en especial a D. César Pérez Martín y D. Miguel Ángel Campo Bescós.

A la **Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE)**.

A las secciones de **Evaluación de Recursos Agrarios** y de **Sistemas de Información y Educación Ambiental**, así como al propio Departamento de **Desarrollo Rural y Medio Ambiente** del Gobierno de Navarra, y en especial a D. José Joaquín Bueno Zamora y D. Luis Sanz Azcárate.

Al servicio de **Meteorología y Climatología** del Gobierno de Navarra, gestionado por la empresa filial del Grupo Tragsa; Tragsatec, y en especial a Dña. Haizea Sola Núñez y D. Alejo Berastegi.

A mis padres, **Berna Moreno** y **Miguel Ángel González**.

ANEXO I

Tratamiento de la información territorial.

I.1. Herramientas utilizadas.

Los avances en el campo de la informática durante las tres últimas décadas junto con un gran esfuerzo invertido en la recopilación de datos de todo tipo han permitido el desarrollo y aplicación de modelos de simulación hidrológica. Precisamente, la representación física de una cuenca hidrográfica se puede efectuar a través de la modelización de la misma. Los elementos hidrológicos se construyen separando el ciclo hidrológico en fracciones manejables, limitando la parte de interés. Estas fracciones se conectan a una red dendrítica para simular el proceso de escorrentía. Cualquier flujo de energía en el ciclo puede ser representado mediante una formulación matemática, ya que estos modelos incorporan ecuaciones que describen los procesos de transporte y expresan balances hídricos a través del tiempo.

La mayor ventaja de los modelos de simulación es que permiten manejar gran cantidad de información que sirve luego de entrada para los algoritmos matemáticos que rigen el modelo de simulación como un conjunto. Otra ventaja importante es que se pueden comprobar los efectos de distintas intervenciones en la cuenca rápidamente y de forma fiable. Es decir que constituyen una valiosa herramienta para la toma de decisiones técnicas.

Por otro lado están las desventajas de estos modelos de simulación. La mayor limitación de los mismos es su improbable calibración en situaciones donde los datos son escasos. La precisión de los modelos está determinada, en gran parte, por la disponibilidad tanto de datos necesarios para el funcionamiento del mismo, como de series de datos de las variables calculadas; imprescindibles, estas últimas, para una calibración del modelo. Además, es necesario introducir al modelo series de datos adicionales o incluso mejorar directamente las formulaciones matemáticas empleadas para representar mejor la conducta de la cuenca.

Sin embargo y a pesar de sus limitaciones, los modelos de simulación proporcionan el camino más idóneo y científicamente avanzado para la comprensión de los procesos hidrológicos en cuencas complejas.

Para este estudio se ha utilizado como sistema de modelización el *HEC-HMS 3.5*, soportado por los programas *ArcView GIS 3.2a* y *HEC-GeoHMS 1.1.*, software informáticos los cuales se detallan a continuación.

I.1.1. HEC-HMS 3.5

En función de las necesidades y de los modelos disponibles se ha elegido el *Hydrologic Modeling System*, en su versión más actual; la 3.5 de agosto 2010, ya que es un modelo muy extendido entre los hidrólogos y su fiabilidad ha quedado demostrada en base a la amplia experiencia acumulada en el uso del mismo.



Figura I.1.- Icono del programa HEC-HMS.

Es un modelo versátil, porque contiene una gran variedad de herramientas para la gestión de simulaciones hidrológicas, permitiendo modelizar varios tipos de procesos. Además, su funcionamiento es bastante intuitivo y de sencilla comprensión. Está soportado por parte de los programas de información territorial más utilizados. En particular acepta la información producida por parte del *HEC-GeoHMS 1.1* como puntos de inicio para la modelización hidrológica. Cada componente del modelo representa una fase en el proceso de generación y circulación de escorrentía a través de la cuenca. El programa dispone de varias opciones para ejecutar la función de dichos componentes. Todos los componentes se pueden introducir y modificar. Sus características lo hacen perfectamente adecuado para el estudio de avenidas extraordinarias del tipo de las estudiadas. Además teniendo en cuenta que el modelo no contempla los cambios de humedad en el suelo, la simulación es realista siempre y cuando se trabaje con periodos de tiempo breves, para los cuales, precisamente, se puede asumir una humedad constante. En el Anexo N°2 se detalla más específicamente los elementos y las aplicaciones de este programa.

I.1.2. ArcView GIS 3.2a

Es uno de los programas de información territorial más utilizados por el *Environmental System Research Institute* (ESRI). Aunque es un programa antiguo (Existen ya versiones más actualizadas como ArcGIS 9.x, o incluso ArcGIS 10) sigue, sin embargo utilizándose todavía, ya que existe una larga base de herramientas presentes en la red compatibles con esta versión del programa. Además, sirve de enlace con muchos modelos de simulación todavía vigentes.



Figura I.2.- Icono del programa ArcView GIS.

Los progresos del *Hydrologic Engineering Center* (HEC, Davis Ca.) en la creación de herramientas de GIS para la modelización hidrológica e hidráulica son el resultado de muchos años de trabajo en la utilización de datos geoespaciales. *GeoHMS versión 1.0* ha sido desarrollado para utilizar las informaciones digitales de la versión *ArcView 3* para construir modelos hidrológicos. Además el desarrollo de información sobre cuencas hidrológicas es de ayuda para la estimación de parámetros hidrológicos. Los datos territoriales utilizados en *ArcView* fueron de dos tipos. Datos de tipo vectorial, tratados en forma de Shapefile, y datos raster, en forma Grid File.

I.1.3. HEC-GeoHMS 1.1

El software *HEC-GeoHMS* es un programa de implementación de la tecnología GIS para la ingeniería hidrológica. Permite visualizar información espacial, documentar características de cuencas hidrográficas, realizar análisis espacial, delinear subcuencas y ríos, construir *inputs* para modelos hidrológicos, y ayudar en la preparación de un informe. Trabajar con *HEC-GeoHMS* permite, además, crear *inputs* hidrológicos que pueden ser empleados directamente en *HEC-HMS* en el desarrollo de un modelo hidrológico (GHME, 2003).

1.2 Cortar los mapas.

El tratamiento de la información de partida se ha realizado utilizando en conjunto las herramientas de los programas *ArcView GIS 3.2a* y *HEC-GeoHMS 1.1*. Además, a partir de documentos contenidos en *ArcView (View, Tables, Charts, Layouts, Scripts)* como los generados al cargar *HEC-GeoHMS*, se obtienen dos tipos de documentos adjuntos que permiten trabajar en diferentes direcciones. Para el *Terrain Preprocessing* y la gestión de base de datos espaciales se utilizó *MainView*. Con respecto a las herramientas necesarias para la construcción del modelo hidrológico para *HEC-HMS* se encuentran en *Projview*.

Los mapas empleados se refieren a toda la Navarra. La cantidad de datos es demasiado extensa por lo que el trabajo que se limita a la cuenca Arazuri. Para ser más rápidos en la obtención de los resultados lo primero que se ha hecho ha sido cortar los mapas mediante la utilización de la función *Clip*. En concreto se ha cortado el Modelo Digital del Terreno de Navarra (Universal Transverse Mercator 1:25000), que contiene la distribución espacial de los valores de altitud de la superficie del terreno, tal y como se muestra en la figura siguiente.

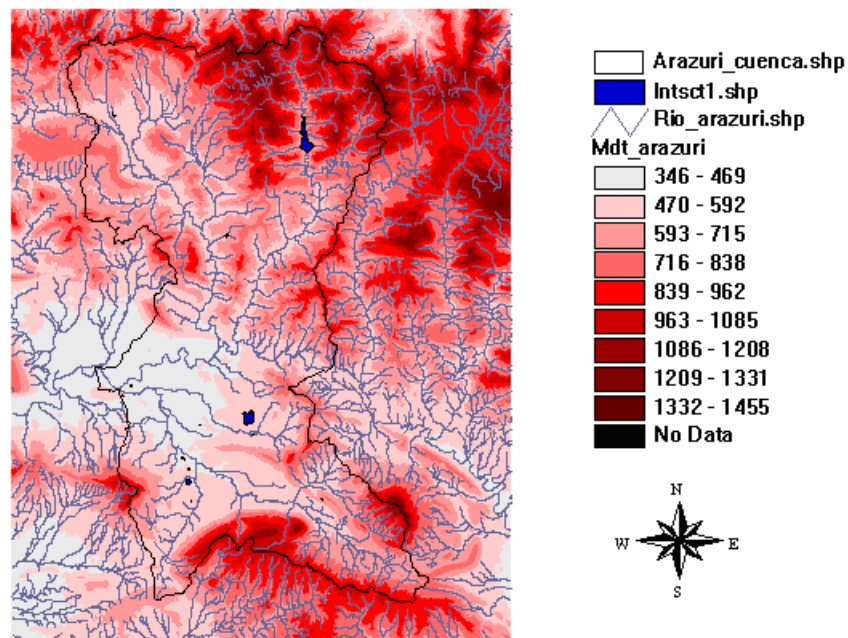


Figura I.3.- Mapa del MDT Arazuri.

1.3 Terrain Preprocessing.

- *Terrain reconditioning.*

Modifica el terreno mediante imposición de líneas de sobre una mapa bajando y subiendo la elevación de las celdas entre las líneas de flujo. Esta función requiere dos parámetros iniciales, un mapa de elevaciones y un mapa de flujos. En este caso se ha utilizado el MDT Arazuri y el mapa de los ríos de Navarra. La función emite un mapa corregido.

- *Fill Sinks.*

Es una función que ayuda a obtener el mejor resultado en el *Terrain preprocessing*. Lo que hace es remover eventuales depresiones o pozos generados por el proceso de reparación.

- *Terrain Preprocessing.*

Es el primer paso para utilizar HEC-GeoHMS. Un modelo de terreno se utiliza como *input* para derivar ocho conjuntos de datos que colectivamente describen los modelos de drenaje de la cuenca y permiten delinear subcuencas y ríos. Tiene que ser calculado en *MainView*. Permite bajar la elevación de las celdas de flujo y bajar las celdas próximas al flujo. El terreno se prepara y analiza mediante el enfoque 8-puntos de fluencia (*8-pour point approach*) para determinar las trayectorias de flujo. El conjunto de datos resultante hace como base de datos espacial por el estudio. El DEM tiene que ser revisado para que represente de mejor manera las condiciones de campo.

- *Flow direction.*

Define la dirección del flujo mas escarpado para cada celda mediante el algoritmo de los ocho-puntos de fluencia.

- *Flow accumulation.*

Determina el número de celdas drenadas a partir de cada celda. Este valor se calcula a partir del flujo acumulado en cada celda multiplicado por su área.

- *Stream definition.*

Define cada celda por el flujo en esa acumulado a partir de un umbral definido manualmente. Se obtienen líneas de flujo.

- *Stream segmentation.*

Esta función permite dividir el flujo en tramos. Los tramos son las secciones del flujo que conectan dos funciones, una confluencia y el punto de salida, o una confluencia y la línea de drenaje.

- *Watershed delineation.*

Define subcuencas y líneas divisorias de aguas para cada segmento de flujo.

- *Watershed Polygon Processing.*

Convierte las subcuencas en representaciones vectoriales. De esta manera se crea un mapa, "*Wshedshp.Shp*", que será el punto de comienzo para el proceso de modelización de la cuenca.

- *Stream Segment Processing.*

Convierte los tramos de los ríos en representaciones vectoriales. De esta manera se crea un mapa, "*River.shp*", que será el punto de comienzo para el proceso de modelización de los ríos.

- *Watershed Aggregation.*

Esta función agrega las subcuencas en cada confluencia de ríos. Sirve para delinear interactivamente las subcuencas y facilitar la extracción de datos.

I.4 Hydrologic Model Setup.

Esta función permite extraer las informaciones obtenidas en *MainView* y generar un nuevo proyecto en *Projview*, definiendo el punto de salida de la cuenca Arazuri. La extracción supone la de creación de puntos de control específicos. Una vez elegido el punto de salida, desde ese punto se definen los afluentes de la cuenca extraída. Es posible con el uso de las funciones *Start new project* y *Generate project* dar un nuevo nombre al proyecto y crear un conjunto de datos que contenga informaciones extraídas y relacionadas.

I.5 División en subcuencas.

Una vez generado, el conjunto de datos extraídos por HMS viene a ser cargado en la ventana *Projview* para que la delineación de las subcuencas pueda ser revisada. La división en subcuencas se ha hecho según criterios diferentes. El primer criterio utilizado ha sido dividir las cuencas de los ríos y afluentes principales del Río Arga. Esta primera división se ha hecho durante el *Terrain Preprocessing*. Algunas cuencas eran muy extensas mientras que otras eran muy pequeñas. En particular las cuencas del río Ulzama y del río Arga al norte, y del río Elorz al sur, tenían dimensiones excesivas. Se ha hecho una división posterior mediante un criterio diferente: Dividendo el río más largo en tres puntos equidistantes entre ellos, para obtener cuencas con aproximadamente la misma área. Para dividir con precisión las cuencas se han utilizado las funciones específicas: *Identify contributing area* y *Subdivide basin*. Mediante estas herramientas es posible delinear la dirección del flujo del agua por cada celda y dividir las subcuencas con extrema precisión.

En dos casos se ha sido elegido el punto de salida los reservorios de agua existentes: El Embalse de Eugui y la balsa de Ezkoriz. Estas dos subcuencas tendrán características diferentes respecto a las demás.

Al final, la cuenca de estudio ha sido dividida en 18 subcuencas.

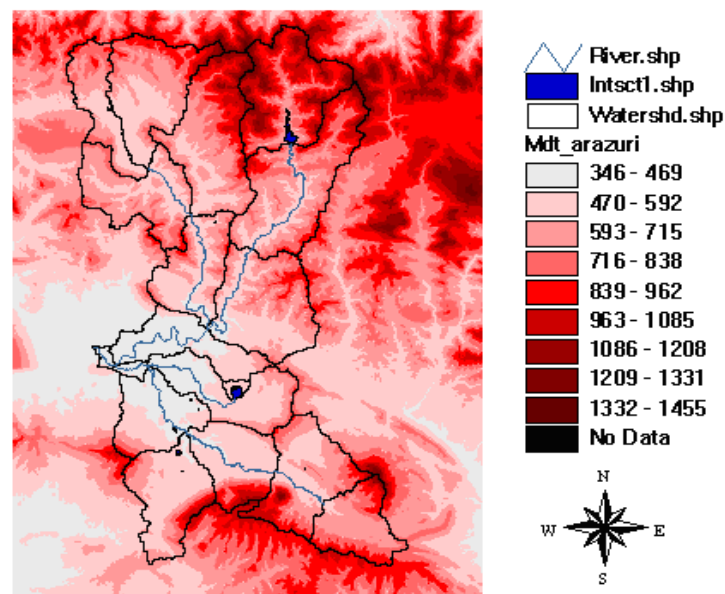


Figura I.4.- Mapa detallado de las subcuencas con algunos de los ríos principales.

I.6 Mapa del CN.

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo y queda retenida en él. Se refiere a la circulación del agua en el interior del terreno. La capacidad de infiltración es la intensidad máxima de agua de lluvia que un suelo puede absorber (Chow, 1994). Decrece con el tiempo, a partir de un máximo que se sitúa en el comienzo de la lluvia. Si la intensidad de la lluvia es inferior a la capacidad de infiltración, la tasa de infiltración será inferior a ésta.

En la infiltración influyen tanto las características del terreno como las del agua que se infiltra:

- Condiciones de la superficie.
- Características del suelo.
- Condiciones ambientales.
- Características del agua.

Un método muy utilizado para la medida de la infiltración ha sido desarrollado por el *Soil Conservation Service* (SCS) del Departamento de Agricultura de los EEUU (USDA). En este método la altura de lluvia efectiva es función del volumen de precipitación total y de un parámetro de pérdidas denominado número de curva CN.

El Número de Curva (*Curve Number* - CN) es un parámetro de referencia empírico y adimensional, cuyos valores se encuentran en el rango de 0 a 100. El valor de 100 corresponde a superficies impermeables donde la capacidad de almacenamiento de la cuenca es 0 y no hay posibilidad de pérdidas o abstracciones. El valor de 0 es para superficies totalmente permeables donde la capacidad de almacenamiento es ilimitada.

El Número de Curva (CN) depende de factores que influyen en la generación de escorrentía de la cuenca:

- * Tipo hidrológico del suelo.
- * Uso del suelo.
- * Condición superficial del suelo.
- * Condición de humedad antecedente.

Para obtener valores correctos del CN para la cuenca del proyecto se han considerado por separado los factores que lo caracterizan. En particular se han desarrollado un mapa de suelos y otro de usos de suelos.

I.6.1 Tipo hidrológico del suelo.

Los grupos de suelo se han obtenido basándose sobre las tablas de asignación del CN editadas por el SCS.

Los cuatro grupos hidrológicos de suelos según esta tabla son A, B, C y D. Dicha tabla se muestra a continuación:

GRUPO	CARACTERISTICAS	TEXTURA
A	Capacidad de infiltración elevada Profundos, muy bien drenados Intensidad de transmisión de agua alta	Arenosa Arenoso franca Franco arenosa
B	Capacidad de infiltración moderada cuando están humedecidos Moderadamente profundos, bien drenados Intensidad de transmisión de agua moderada	Franco limosa Franca limosa
C	Capacidad de infiltración baja Intensidad de transmisión de agua baja	Franco arcillo arenosa Franco arcillo limosa Franco arcillosa
D	Capacidad de infiltración baja Sobre material rocoso impermeable Capa freática alta	Arcillo arenosa Arcillo limosa Arcillosa

Tabla I.1.- Grupos hidrológicos de suelo.

El primer paso para asignar correctamente a cada suelo el grupo hidrológico ha sido comparar los símbolos del Mapa de suelos de Navarra “*edafn00*” con las descripciones de los mismos en la leyenda del mapa de suelos de Navarra (1:50000, Departamento de edafología de la Universidad Pública de Navarra).

Para decidir a cual de los grupos hidrológicos se refiere cada tipo de suelo del mapa de suelos se han considerado, en orden de importancia: drenaje, textura, profundidad y régimen hídrico de cada suelo. Como ayuda en esta operación se ha utilizado la clasificación de suelos según clase de drenaje del *Soil Survey Manual* (1993).

CLASES DE DRENAJE		GRUPO HIDROLOGICO
Excesivamente drenado	6	A
Parcialmente excesivamente drenado	5	A
Bien drenado	4	B
Moderadamente drenado	3	B
Imperfectamente/escasamente drenado	2	C
Escasamente drenado	1	C
Muy escasamente drenado	0	D

Tabla I.2.- Clasificación según el tipo de drenaje del “*Soil Survey Manual*”.

Las características de los parámetros elegidos muchas veces han resultado claras y la asignación del grupo ha resultado sencilla. Sin embargo, en otros casos se han encontrado dificultades, debidas a la elevada precisión de los datos de partida y la simplificación impuesta desde el método.

Clasificación	Símbolo	Grupo Hidrológico	Drenaje	Textura	Regimen Hídrico	Profundidad
Alaiz	Al	B	Bueno	Franco arcillosa limosa		
Anoz	An	B	Bueno	Franco, franco argilosa	Xérico y Údico	
Arazuri	Ar	C	Imperfecto			Profundo
Arizu	Ar	B	Bueno	Franco arcillosa	Údico	
S. sobre glacia	Gl	B	Bueno			Profundo
Aibar	Ib	B	Bueno	Franco arcillosa, arcillo limosa-arenosa	Xérico	
Iragui	Ir	B	Bueno o impedido	Franca	Údico	
Labiano	La	B	Bueno	Franca fina, arenosa fina	Xérico y Údico	
Leache	Le	B	Bueno	Franco arcillo arenosa	Údico	
Nuín	Nu	B	Bueno	Arcillo limosa	Údico	
Olagüe	Ol	B	Bueno	Franco arcillo arenosa	Údico	
Oroquieta	Or	C	imperfecto	Arcillosa, arcillo limosa		
Osacain	Os	B	Bueno	Arcillosa	Xérico	Profundo
Otazu	Ot	C	imperfecto			Profundo
Pamplona	Pa	B	Moderadamente bueno	Franco arcillosa	Xérico	
Peña Echauri	Pe	B	Excesivo		Údico	Escasa
El plano	Pl	B	Bueno			
Perdon	Pr	B	Excesivo	Arcillosa		
Sayoa	Sa	B	Bueno	Franco arcillo limosa, arcillosa	Údico	
Solazar	So	B	Bueno	Limosa	Údico	
Astráin	St	C	Escaso	Arcillosa		
Velate-Belate	Ve	B	Bueno	Franca, franco arenoso fina	Údico	
Roca dominante	Rd	D	Muy escaso			
Sobre derrubios de ladera	Dl	B	Bueno			Profundo
S.Someros, material coherente	Sc	C			Xérico	
S.Someros, material deleznable	Sd	B				

Tabla I.3.- Asignación del grupo hidrológico de suelo.

Como se ha dicho, el empleo de este método de asignación simplifica notablemente el mapa de suelos. En particular, no se han encontrado tipos de suelos con características propias del grupo A. La fracción de suelos de pertenencia al grupo D es muy pequeña. La mayoría de los suelos que se encuentran en la cuenca pertenecen a los grupos B y C. La elevada simplificación que se ha hecho es necesaria para obtener los valores del CN.

Una vez asignados los valores del grupo hidrológico a cada suelo, se ha utilizado la función *Geoprocessing dissolve features on an attribute*. Mediante esta función cambia el mapa de suelos según las características de los grupos, de modo que se emplean sólo las características necesarias en la asignación del CN.

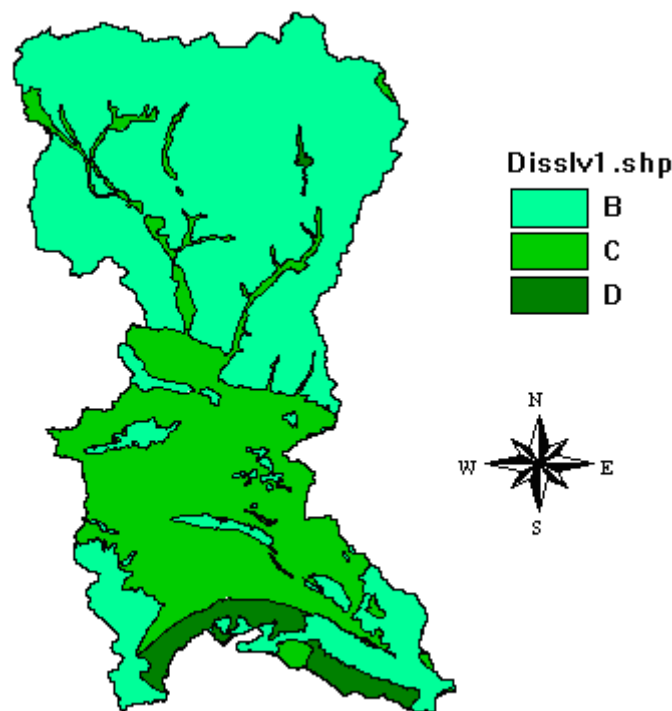


Figura I.5.- Mapa de suelos.

I.6.2 Uso del suelo.

En la asignación de los usos del suelo se han comparado los símbolos del mapa de uso suelo cargado en *ArcView* con las descripciones de los mismos en la leyenda del Mapa de cultivos y aprovechamientos de Navarra. Al hacerlo se ha simplificado mucho la tabla inicial.

En la realidad cada símbolo del mapa pertenece a una tipología específica de uso. Por ejemplo, los bosques estarían divididos por clase de plantas mayormente presentes y los cultivos herbáceos por cada tipo de cultivo presente en la zona.

La asignación del tipo y descripción de la cubierta a cada elemento de la leyenda se ha de extrapolar a las nuevas tablas de asignación del CN.

Tabla I.4.- Asignación del uso de suelo.

Uso mapa	Uso 9901	Uso según las tablas CN
Ac	Bosque	Bosque
An	Bosque	Bosque
Ba	Bosque	Bosque
C±	Camino	Calles asfaltadas y carreteras
Ca	Bosque	Bosque
Cf	Cultivo herbáceo	Grano pequeño (en curvas de nivel)
Ch	Cultivo herbáceo	Grano pequeño (en curvas de nivel)
Cl	Bosque	Bosque
Cp	Cultivo lenoso	Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales)
Cr	Bosque	Bosque
Cs	Bosque	Bosque
Cu	Bosque	Bosque
E	Barbecho	Barbecho
Fe	Bosque	Bosque
Fs	Bosque	Bosque
H	Huerta	Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales)
He	Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
IA	Improductivo	Superficies impermeables
IE	Improductivo	Superficies impermeables
II	Improductivo	Superficies impermeables
IL	Improductivo	Superficies impermeables
IR	Pasto	Pastos, prados o forraje permanente para pastoreo
IS	Pasto	Pastos, prados o forraje permanente para pastoreo
IU	Urbano	Distritos urbanos
Js	Bosque	Bosque
La	Bosque	Bosque
Lb	Cultivo herbáceo	Grano pequeño (en curvas de nivel)
Ma	Cultivo leñoso	Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales)
Mbr	Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
Mbs	Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
Mc	Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
Mco	Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
Men	Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
MI	Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
Mm	Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
Mo	Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
Mz	Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
No	Cultivo leñoso	Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales)
P	Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
Pa	Bosque	Bosque
Pd	Cultivo herbáceo	Grano pequeño (en curvas de nivel)
Pe	Cultivo leñoso	Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales)
Ph	Bosque	Bosque
Phy	Bosque	Bosque
Pme	Bosque	Bosque

Tabla I.4.- Asignación del uso de suelo (Continuación).

Uso mapa	Uso 9901	Uso según las tablas CN
Pn	Bosque	Bosque
Po	Bosque	Bosque
Ps	Bosque	Bosque
Pt	Pasto	Pastos, prados o forraje permanente para pastoreo
Pv	Bosque	Bosque
Qf	Bosque	Bosque
Qp	Bosque	Bosque
Qpy	Bosque	Bosque
Qr	Bosque	Bosque
Qrt	Bosque	Bosque
Qru	Bosque	Bosque
Rp	Bosque	Bosque
S	Bosque	Bosque
Sa	Bosque	Bosque
Uc	Urbano	Distritos urbanos
UI	Bosque	Bosque
V	Cultivo leñoso	Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales)
Vv	Cultivo leñoso	Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales)

También en este caso, la elección no ha sido sencilla, debido a que la variabilidad de los usos del suelo es muy amplia. Esto hace que sea extremadamente difícil simplificar el mapa de usos sin pérdida de informaciones.

Por ejemplo, para caracterizar los cultivos herbáceos se ha puesto un grano pequeño en curvas de nivel, que es la forma de manejo más utilizada en la zona de estudio. En la mayoría de los casos el dato es bastante exacto, pero no siempre. Es una simplificación muy fuerte de la realidad.

Al final los tipos de uso de suelo resultantes han sido 9, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Uso 9901	Uso tablas CN
Bosque	Bosque
Matorral	Matorral, mezcla de matorral y maleza
Cultivo leñoso	Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales)
Cultivo herbáceo	Grano pequeño (en curvas de nivel)
Huerta	Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales)
Pasto	Pastos, prados o forraje permanente para pastoreo
Camino	Calles asfaltadas y carreteras
Urbano	Distritos urbanos
Improductivo	Superficies impermeables

Tabla I.5.- Tipos de uso de suelo por la tabla de asignación del CN.

Una vez asignados los usos de suelo de acuerdo con las descripciones de la cubierta se utiliza la función *Geoprocessing dissolve features on an attribute*. Mediante esta se cambia el mapa de uso de suelos según las simplificaciones adoptadas. Esto para utilizar solo las características que me sirven en la asignación del CN, tal y como se muestra en la siguiente figura.

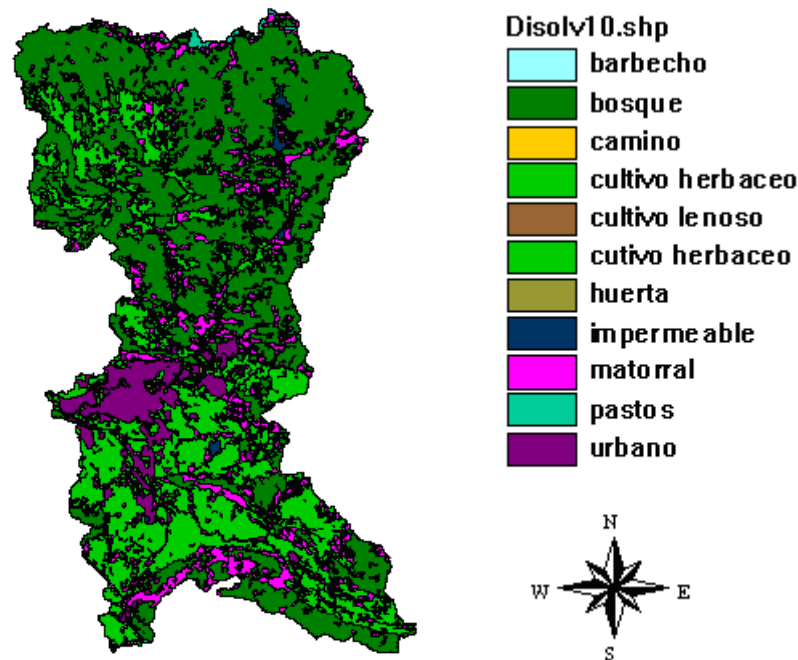


Figura I.6.- Mapa del uso de suelo.

I.6.3 Condición superficial del suelo.

Se ha tenido en cuenta un estado hidrológico medio o bueno según las posibilidades de elección. Esto porque para las necesidades de este trabajo es una situación bastante realista.

I.6.4 Condición de humedad antecedente.

Las condiciones de humedad antecedente (*Antecedent Moisture Condition* - AMC) se refieren a la capacidad del suelo de absorber la lluvia caída durante el evento, o bien su capacidad de producir escorrentía superficial. Los valores de AMC teóricos se hallan entre 1 y 4. Las tablas de asignación del CN cuentan con tres diferentes opciones:

- Humedad antecedente 1 (Suelos secos).
- Humedad antecedente 2 (Suelos medios).
- Humedad antecedente 3 (Suelos húmedos).

Para cada condición, el SCS ha redactado una tabla específica de asignación de los CN. Previamente a la elección de esta característica se debe conocer el objetivo de la asignación. Por ejemplo, si el mapa de CN es utilizado para avenidas que pertenecen a periodos del año en los que el tiempo es generalmente seco, o en una zona en la que no suele llover abundantemente, se puede utilizar la tabla de asignación de AMC 1. Por el contrario, cuando se trata de avenidas extraordinarias o en periodos del año en los que las precipitaciones suelen ser abundantes, la tabla a elegir será la AMC 3.

Para este modelo, las avenidas de interés pertenecen a este segundo tipo. Sin embargo, inicialmente se utilizaron aquellas tablas correspondientes a una condición de Humedad antecedente 2. Estas son las más utilizadas ya que comprenden condiciones medias, generalmente bastante extendidas. Pero esta primera asignación deberá ser modificada luego de la calibración del modelo. Esto es así pues un modelo de evento supone la introducción y análisis de avenidas extraordinarias para las cuales las condiciones de humedad antecedente son más extremas. Para cada avenida tendrán que ser estimadas sus propias condiciones de humedad antecedente, que son particulares según las condiciones iniciales del sistema real. Resulta, por lo tanto, fundamental reconsiderar la asignación aquí realizada luego de estudiar la distribución de las precipitaciones utilizadas por el evento considerado. En el Anexo “*Análisis de la distribución espacial de las precipitaciones*” se muestran las CHA para cada evento.

I.6.5 Creación mapa del CN.

Una vez analizados por separado los factores que contribuyen a la asignación del CN, se han unidos las informaciones de los dos mapas desarrollados. Utilizando la función *Geoprocessing intersect two themes* se ha obtenido un mapa único conteniendo las características relativas a grupos de suelos y usos.

SUELO	USO SUELO	N_SUELO	N_USO	SUMA	CN
B	matorral	1	80	81	56
B	bosque	1	20	21	60
B	huerta	1	60	61	65
B	pastos	1	90	91	69
C	matorral	2	80	82	70
C	bosque	2	20	22	73
B	cultivo herbáceo	1	40	41	73
C	cultivo leñoso	2	50	52	76
C	huerta	2	60	62	76
D	matorral	3	80	83	77
D	bosque	3	20	23	79
C	pastos	2	90	92	79
C	cultivo herbáceo	2	40	42	81
D	cultivo herbáceo	3	40	43	84
D	pastos	3	90	93	84
C	barbecho	2	10	12	88
B	urbano	1	100	101	92
C	urbano	2	100	102	94
D	urbano	3	100	103	95
B	camino	1	30	31	98
C	camino	2	30	32	98
B	impermeable	1	70	71	98
C	impermeable	2	70	72	98
D	impermeable	3	70	73	98

Tabla I.6.- Asignación del CN.

Utilizando la tabla resultante se ha impuesto el método para asignar el valor del CN. Se han creado nuevas columnas:

- *N_suelo*: Los suelos se han numerado de 1 a 3 de forma que a cada grupo de suelo correspondiese un número.
- *N_uso*: A cada tipo de uso del suelo se han asignado una decena, de 10 a 100.
- *Suma*: Mediante la función *Suma* se han sumado los valores de las columnas *N_suelo* y *N_uso* para cada polígono del mapa.
- *CN*: A cada número de la columna “*Suma*” corresponde lo mismo CN.

El CN se ha dado a partir de las tablas de asignación, según condiciones medias de humedad antecedente y buena del estado hidrológico del suelo.

Usos de suelo	Suelos			
	A	B	C	D
Barbecho	-	-	88	-
Bosque	-	60	73	79
Matorral, mezcla de matorral y maleza	-	56	70	77
Mezcla de bosques y hierba (huerto o árboles frutales)	-	65	76	-
Grano pequeño (en curvas de nivel)	-	73	81	84
Pastos, prados o forraje permanente para pastoreo	-	69	79	84
Calles asfaltadas y carreteras	-	98	98	-
Distritos urbanos	-	92	94	95
Superficies impermeables	-	98	98	98

Tabla I.7.- Asignaciones del *Curver Number* (CN).

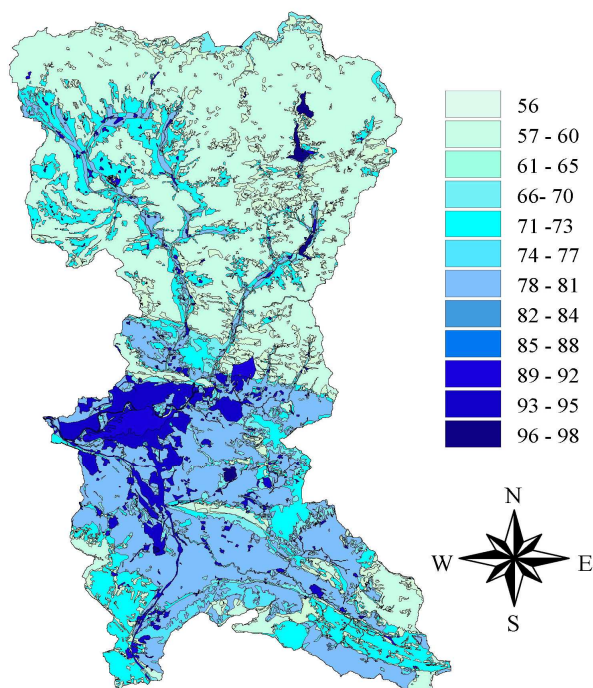


Figura I.7.- Mapa del CN.

Una vez obtenidos los valores del número de curva (CN) se ha utilizado la función *Geoprocessing dissolve features on an attribute* para obtener un mapa con solo la característica requerida, por intersección de las área a igual CN, obteniendo el resultado que muestra la figura siguiente. Hay que tener en cuenta que esta asignación del CN tendrá que ser reconsiderada posteriormente en función del AMC para cada caso.

Para utilizar el CN como parámetro en HMS se ha transformado el mapa en formato Grid, utilizando la función *Convert to Grid*. Este paso resulta necesario en lugar del empleo sucesivo del CN como parámetro en la modelización de las subcuencas.

I.7 Basin Characteristics.

Una vez que la cuenca de proyecto se haya creado y cargado en *Projview*, se han calculados los parámetros morfométricos principales de la misma. Las características han estado calculadas por tramos y subcuencas, y todas han estado automáticamente calculadas por el programa y fijadas en las tablas de los atributos. En particular se ha calculado:

- *River lenght*

Esta función mide lo largo que es el tramo del río para cada subcuenca y diseña líneas de flujo.

- *River slope*

Este paso extrae la elevación del punto más alto y más bajo de cada tramo y mide la pendiente.

- *Basin centroid*

Con esta herramienta se ha estimado el centroide de cada subcuenca de cuatro diferentes maneras. Por este proyecto se ha calculado primero utilizando el *Bounding Box method*, que aproxima con una figura rectangular cada subcuenca y sitúa en el medio el centroide. Después se calcula también mediante el *Ellipse method*, que aproxima cada subcuenca con una elipse y mide el centroide al centro de la misma. De esta manera se calcula un centroide corregido respecto al método precedente, y se mide también su elevación.

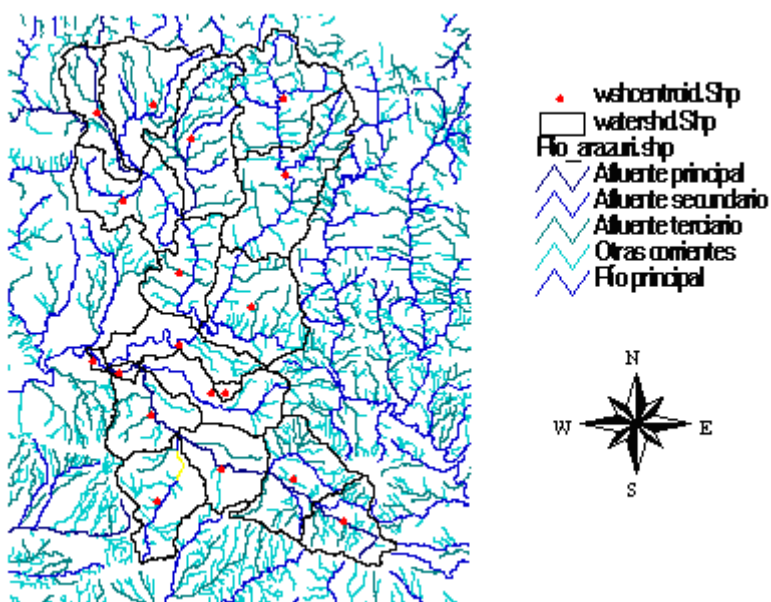


Figura I.8.- Mapa de *Basin centroid*.

- *Longest flow path.*

Esta operación ha permitido calcular importantes características físicas de las subcuencas como son la trayectoria de flujo más larga, la elevación máxima y mínima, la pendiente entre las dos, y la pendiente entre el 10 % y el 85% del tramo más largo.

- *Centroidal flow path.*

Esta función desplaza el centroide anteriormente calculado proyectándolo hasta encontrar la trayectoria de flujo más larga. La medida se hace a partir del punto de proyecto sobre la trayectoria de flujo más larga hasta el punto de salida de la subcuenca.

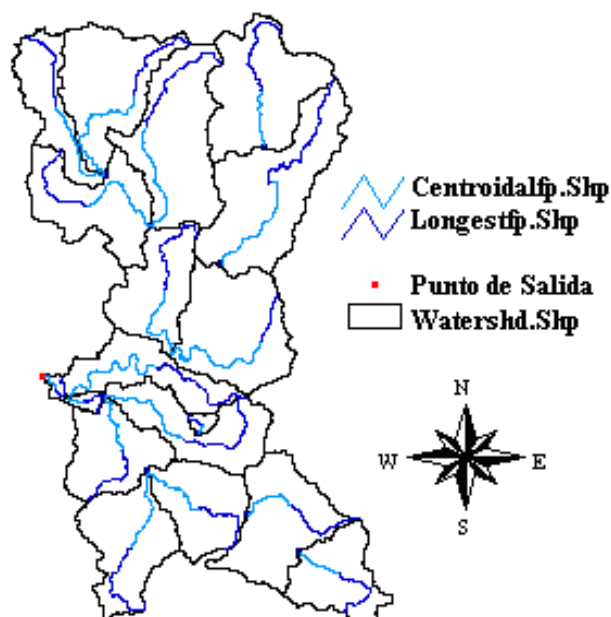


Figura I.9. - Mapa de *Longest flow path* y *centroidal flow path*.

I.8. Hydrologic parameters.

Para utilizar el proyecto creado como base para modelizar la cuenca es necesario calcular parámetros específicos de la cuenca.

- *Subbasin curve number*

Esta función calcula el valor medio del CN por cada subcuenca a partir del mapa del CN en formato Grid.

- *TR55 Flow path segments*

Esta función permite crear un conjunto de puntos mediante el uso del régimen de flujo a lo largo de la trayectoria de flujo más larga por la computación del tiempo de concentración. Se crean así dos puntos de quiebre del flujo (*flow break points*) en cada trayectoria de flujo más larga de cada subcuenca.

- *TR55 Flow segment parameters*

Con esta herramienta se han calculado pendiente y largo de cada TR55 trayectorias de flujo.

- *Basin Lag Time*

Se ha estimado mediante dos pasos:

- *Basin slope*

Con este paso se ha medido la pendiente media de cada subcuenca, que hace de *input* por el cálculo del *CN Lag Time*.

- *CN Lag method*

Calcula el *Lag Time* en horas de cada subcuenca utilizando la fórmula de Victor Mockus del método del CN:

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{2.92Y^{0.5}} \quad (I.1)$$

En donde:

- T_{lag} → Lag Time de la subcuenca, en horas.
- L → Largura fluvial hasta la divisoria, en kilómetros.
- CN → Número de Curva medio de la subcuenca.
- Y → Pendiente fluvial, en %.

I.9 HMS.

Una vez calculados los parámetros fundamentales de la cuenca, se han realizado algunas tareas relacionadas con HMS. Este paso ha sido fundamental para trasladar el proyecto en HMS, mediante asignación de nombres por defecto de las subcuencas, unidades de conversión, creación de la cuenca esquemática, creación de los archivos de HMS.

- *Reach AutoName*

Esta función nombra cada tramo de manera convencional con “R” y una cifra, a partir del tramo más alto al más bajo.

- *Basin AutoName*

Esta función nombra cada subcuenca de la más alta a la más bajo, convencionalmente con “W” y una cifra.

- *Map to HMS units*

Esta función convierte las características físicas de los ríos y subcuencas desde las unidades del mapa en las unidades de HMS.

- *HMS Data Check*

El programa revisa las series de datos por consistencia en la descripción de la estructura hidrológica del modelo. En particular lleva la cuenta de las relaciones entre los segmentos de ríos, subcuencas, puntos de salida, y otras características.

- *HEC-HMS Basin Schematic*

Esta función es la representación en GIS del modelo hidrológico de la cuenca comprende los elementos de la cuenca y sus conexiones. Se crea un conjunto de datos de puntos y uno de líneas. Los iconos de cada subcuenca se ponen en el punto en el que está el centroide.

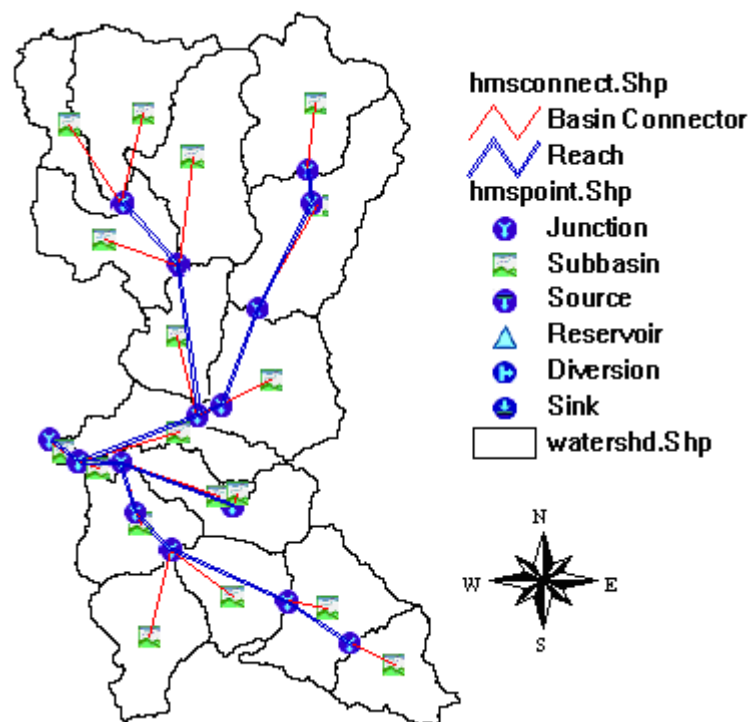


Figura I.10.- Mapa HEC-HMS *Basin Schematic* (Esquema de la cuenca).

- *HMS Legend*

Este proceso lleva a cabo la simbología de HMS para representar puntos y líneas de manera más descriptiva, como embalses, tramos, subcuencas, o fuentes.

- *Add Coordinates*

Este paso adjunta las coordenadas espaciales a los elementos hidrológicos. El anexo de coordenadas permite de exportar los datos de GIS en formato ASCII en manteniendo la información geoespacial.

- *Standard HMS processes*

Con GeoHMS es posible exportar algunos parámetros hidrológicos en el modelo de la cuenca en HMS. Para los parámetros de los cuales todavía no se tiene valor calculado en GIS, pero que son necesarios para el correcto funcionamiento del proyecto en HMS, se puede crear datos de partida para configurar las características de HMS. De esta manera se ha elegido los métodos requeridos para el proyecto y valores nulos para los parámetros todavía no calculados.

- *Background Map File*

Mediante esta función se ha puesto la información geográfica del perímetro de cada subcuenca y las líneas de flujo en formato ASCII para que pueden ser utilizados desde HMS.

- *Lumped-Basin Model; Grid-Cell Parameter File; Distributed-Basin Model*

Mediante estas funciones se ha puesto los elementos hidrológicos, sus conexiones, y las informaciones relacionadas en formato ASCII que puede hacer como base datos de partida por HMS.

- HMS Project Setup; HMS Connection

Esta función define un subdirectorio en el proyecto de HMS y pega ahí todas las componentes creadas en *Geo-HMS*. De esta manera se ha creado un conjunto de datos independientes que pueden ser directamente cargados y utilizados por HMS.

Las características calculadas mediante las herramientas descritas se han puesto en las tablas de los atributos de los mapas “*Watershd.Shp*” (Tabla siguiente) y “*River*”. A cada parámetro calculado pertenece una columna de la tabla.

NAME	CN	BASINSLP	LONGESTFL	CENTROIDAL	ELEVATION	AREA	BASINLAG
R10W10	69	600,23	16808,505	7901,955	499,931	43,618	26,400
R20W20	69	630,69	17038,835	12804,646	649,000	67,716	26,040
R30W30	85	471,50	22380,435	12411,448	471,000	39,451	23,160
R40W40	85	420,91	4081,676	1510,400	394,857	2,341	6,300
R50W50	85	424,72	4982,716	1468,718	408,000	3,246	7,320
R60W60	62	772,38	20978,048	10052,260	674,000	74,530	33,300
R170W70	65	648,85	17058,810	8724,747	611,000	52,553	28,500
R120W80	64	692,86	20103,048	12032,895	580,000	61,437	32,280
R150W90	66	665,51	15793,555	8036,575	560,000	32,739	25,800
R410W100	62	742,31	23631,171	9706,181	692,000	83,099	37,380
R440W120	80	536,76	18474,190	8633,021	514,000	45,535	21,960
R310W130	81	500,66	12579,646	5838,782	430,000	41,029	16,200
R340W140	78	598,93	14366,778	6699,811	473,000	40,997	18,060
R290W150	76	615,45	15648,149	7053,732	528,000	50,085	20,220
R370W160	73	708,18	12371,804	5153,427	559,639	56,328	17,040
R350W170	70	762,24	10860,408	3975,610	634,000	37,076	16,080
R390W180	61	945,03	14787,489	5252,386	810,000	68,836	23,340
R420W190	81	504,21	2552,082	849,264	477,000	2,866	4,500

Tabla I.8.- Atributos del archivo “*Watershed*”.

I.10. Determinación de la lluvia areal: Polígonos de Thiessen.

Se han trazado los polígonos de Thiessen en las cuencas analizadas y se ha obtenido la representatividad de cada estación en la obtención de la precipitación media en la cuenca.

Los polígonos de Thiessen representan uno de los métodos de interpolación más simples, basado en la distancia euclidiana. Se crean al unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmento de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia.

La creación de los polígonos de Thiessen se ha hecho mediante una extensión añadida a *ArcView*. Por un lado se ha realizado el mapa de la cuenca para las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs), dado que los datos que ofrecen son diezminutales y por lo tanto la precisión para caracterizar los eventos es, a priori, mejor.

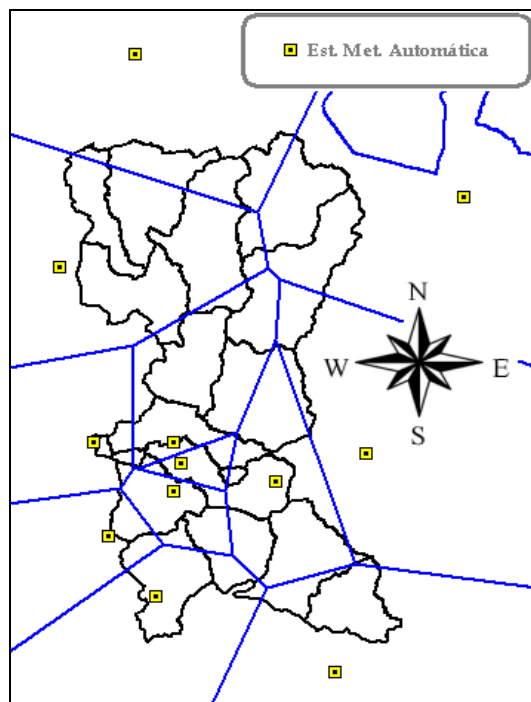


Figura I.11.- Polígonos de Thiessen sólo con las EMAs utilizadas.

Una vez cargadas las aplicaciones y los archivos correspondientes en el programa sobre la cuenca de proyecto, mediante la función *Shape.returnarea* se ha creado una nueva columna llamada *Area* que contiene el área de cada subcuenca y cuyos datos se muestran en el Anexo correspondiente.

Utilizando la función *Intersection two themes* se ha intersecado los polígonos de Thiessen obtenidos y la cuenca de proyecto, para obtener un mapa único que contengan las dos características.

Siempre en utilizando la función *Shape.returnarea* se ha creado una nueva columna llamada *T_Area* en la tabla de la mapa resultante. Ahí se han calculado las áreas de cada polígono de Thiessen que hacen intersección con cada subcuenca.

Al final se han calculado los pesos que pertenecen a cada estación, mediante inserción de una nueva columna en la tabla, calculada como la fracción de área total ocupada por parte de cada polígono de Thiessen presente en esta área. Prácticamente se traduce en la división de los valores de la columna *Area* por los de la columna *T_Area*.

Del mismo modo, posteriormente se ha realizado para el Thiessen correspondiente al de la realización de las estaciones automáticas y manuales conjuntas.

Este segundo mapa de Thiessen con las EMAs y EMMs de forma conjunta tiene la explicación en que la caracterización de la cuenca de estudio realizada únicamente con las estaciones automáticas, deja prácticamente la parte norte de la misma con una caracterización poco representativa, y cuya deficiencia es solucionable mediante la inclusión de las estaciones manuales.

Sin embargo, al meter las estaciones manuales se crea un problema compatibilidad entre estaciones, que se resolverá mediante lo que se ha llamado “lluvia equivalente”.

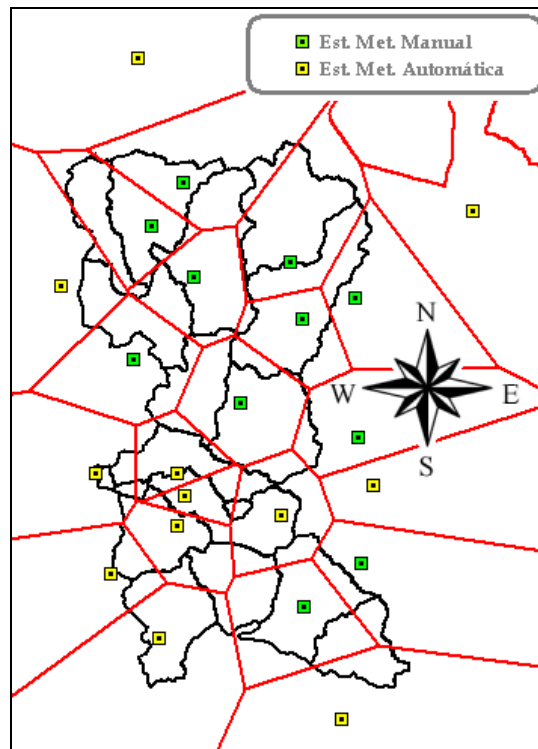


Figura I.12.- Polígonos de Thiessen con todas las estaciones meteorológicas utilizadas.

Las diferencias entre ambas opciones se verán posteriormente cuando se analicen los eventos seleccionados, debiendo ser algo más favorable esta última opción de estaciones de ambos tipos de forma conjunta ya que recoge más información de la zona, especialmente en la zona de cabecera de los ríos Arga y Ulzama.

A continuación se pueden ver los porcentajes que tiene cada estación para cada una de las dos opciones que se han tomado para realizar cada uno de los dos mapas.

Subcuenca	Área Total (m ²)	Estación	Subáreas (m ²)	Peso
R10W10	43618125	Larrabide (Pamplona)	43618125	1
R120W80	61436875	Doneztebe	24201564	0,39
		Oskotz	37235311	0,61
R150W90	32738750	Doneztebe	2739663,1	0,08
		Oskotz	29999087	0,92
R170W70	52553125	Oskotz	48933290	0,93
		Larrabide (Pamplona)	3619835,3	0,07
R20W20	67716250	Beortegi	7913331,9	0,12
		Ilundáin	32248309	0,48
		Larrabide (Pamplona)	27470933	0,41
R290W150	50085000	Carrascal	38587073	0,77
		El Perdón	6571512,6	0,13
		Noáin	4926414,8	0,1
R30W30	39450625	Arazuri	5099474,3	0,13
		Ilundáin	5851578,8	0,15
		ETSIA UPNA (Pamplona)	5646791,7	0,14
		Larrabide (Pamplona)	22852780	0,58
R310W130	41029375	Arazuri	1563394,9	0,04
		El Perdón	9069138,9	0,22
		ETSIA UPNA (Pamplona)	1760161,8	0,04
		Larrabide (Pamplona)	956313,84	0,02
		Noáin	27680366	0,67
R340W140	40997500	Carrascal	9253249,1	0,23
		Ilundáin	18204291	0,44
		Noáin	13539960	0,33
R350W170	37075625	Beortegi	942964,89	0,03
		Getadar	36124332	0,97
R370W160	56327500	Beortegi	1069422,4	0,02
		Carrascal	2461193,3	0,04
		Getadar	13465313	0,24
		Ilundáin	39331572	0,7
R390W180	68836250	Doneztebe	19354745	0,28
		Oskotz	6897311,5	0,1
		Roncesvalles-Orreaga	42584193	0,62
R40W40	2341250	Arazuri	2341250	1
R410W100	83099375	Beortegi	17486394	0,21
		Oskotz	4261951,5	0,05
		Larrabide (Pamplona)	22905431	0,28
		Roncesvalles-Orreaga	38287270	0,46
R420W190	2866250	Ilundáin	2117125,6	0,74
		ETSIA UPNA (Pamplona)	749124,42	0,26

Tabla I.9.- Detalles del peso de cada EMA.

Subcuenca	Área Total (m ²)	Estación	Subáreas (m ²)	Peso
R440W120	45535000	Ilundáin	23923557	0,53
		ETSIA UPNA (Pamplona)	13404960	0,29
		Larrabide (Pamplona)	4710155,4	0,1
		Noáin	3496327,5	0,08
R50W50	3246250	Arazuri	1847680,2	0,57
		ETSIA UPNA (Pamplona)	17254,3	0,01
		Larrabide (Pamplona)	1377652,1	0,42
R60W60	74530000	Doneztebe	16997033	0,23
		Oskotz	50908113	0,68
		Larrabide (Pamplona)	6624854,1	0,09

Tabla I.9.- Detalles del peso de cada EMA (Continuación).

Subcuenca	Estación	Subáreas (Km ²)	Peso
R10W10	Belzunce	11,22751	0,2574
	Irotz	24,86727	0,5701
	Olagüe	2,7645	0,0634
	Zubiri	0,07161	0,0016
	Larrabide (Pamplona)	4,68724	0,1075
R120W80	Belate	25,52921	0,4155
	Iraizotz	34,81361	0,5667
	Olagüe	1,09406	0,0178
R150W90	Belate	0,22988	0,0070
	Belzunce	0,01496	0,0005
	Iraizotz	26,65124	0,8141
	Olagüe	1,63193	0,0498
	Oskotz	4,21075	0,1286
R170W70	Belzunce	23,49021	0,4470
	Iraizotz	0,04997	0,0010
	Olagüe	14,99836	0,2854
	Oskotz	14,01458	0,2667
R20W20	Irotz	49,56758	0,7320
	Zalba	7,80408	0,1152
	Zubiri	0,59844	0,0088
	Ilundáin	8,21749	0,1214
	Larrabide (Pamplona)	1,52865	0,0226
R290W150	Noáin	4,92641	0,0984
	Carrascal	38,58707	0,7704
	El Perdón	6,57151	0,1312

Tabla I.10.- Detalles del peso de cada EMM.

Subcuenca	Estación	Subáreas (Km ²)	Peso
R30W30	Irotz	0,0522	0,0013
	Ilundáin	5,83624	0,1479
	Larrabide (Pamplona)	22,85208	0,5793
	Arazuri	5,09947	0,1293
	ETSIA UPNA (Pamplona)	5,61063	0,1422
R310W130	Noáin	27,68037	0,6746
	Larrabide (Pamplona)	0,95631	0,0233
	El Perdón	9,06914	0,2210
	Arazuri	1,56339	0,0381
	ETSIA UPNA (Pamplona)	1,76016	0,0429
R340W140	Monreal	18,03594	0,4399
	Ilundáin	6,45472	0,1574
	Noáin	12,71137	0,3101
	Carrascal	3,79547	0,0926
R350W170	Monreal	14,62355	0,3944
	Zuazu	7,38459	0,1992
	Getadar	15,06748	0,4064
R370W160	Monreal	40,40022	0,7172
	Zuazu	9,70949	0,1724
	Ilundáin	6,2178	0,1104
R390W180	Belate	7,79606	0,1133
	Eugui	61,04019	0,8867
R40W40	Arazuri	2,34125	1,0000
R410W100	Erro	13,2281	0,1592
	Eugui	25,23375	0,3037
	Irotz	7,07615	0,0852
	Zubiri	37,56137	0,4520
R420W190	Ilundáin	2,11713	0,7386
	ETSIA UPNA (Pamplona)	0,74912	0,2614
R440W120	Ilundáin	23,92356	0,5254
	Noáin	3,49633	0,0768
	Larrabide (Pamplona)	4,71016	0,1034
	ETSIA UPNA (Pamplona)	13,40496	0,2944
R50W50	Noáin	0,00366	0,0011
	Larrabide (Pamplona)	1,37765	0,4244
	Arazuri	1,84768	0,5692
	ETSIA UPNA (Pamplona)	0,01725	0,0053
R60W60	Belate	20,58532	0,2761
	Eugui	3,52073	0,0472
	Iraizotz	3,10598	0,0417
	Olagüe	44,47482	0,5965
	Zubiri	2,84316	0,0381

Tabla I.10.- Detalles del peso de cada EMM (Continuación).

ANEXO II

Descripción del modelo HEC-HMS 3.5.

El modelo HEC-HMS está diseñado para simular la escorrentía superficial que se produce en una cuenca debido a la precipitación. Para ello se representa la cuenca como un sistema de componentes hidrológicos e hidráulicos interconectados entre sí, como por ejemplo un embalse, un canal o el mismo aporte de lluvia. La representación de cada componente requiere una serie de parámetros que especifiquen las características particulares del mismo y las relaciones matemáticas que lo rigen (*Hydrologic Modeling System*, 2006).

La pantalla del programa esta dividida en cuatro partes. Cada una se caracteriza por una finalidad específica.

NOMBRE	LOCALIZACIÓN EN LA PANTALLA	FINALIDAD
<i>Watershed Explorer</i>	En la parte superior izquierda	Organiza los componentes del modelo en carpetas individuales. Está dividido en tres partes: componentes, cálculos y resultados.
<i>Component Editor</i>	En la parte inferior izquierda	Una vez seleccionado un componente o un elemento hidrológico en <i>Watershed Explorer</i> , en <i>Component Editor</i> se eligen los métodos de simulación y se ingresan los parámetros requeridos.
<i>Message Log</i>	En la parte inferior	Muestra todas las notas, atenciones, errores ocurridos durante la ejecución del modelo.
<i>Desktop</i>	En el área remanente	Contiene diferentes ventanas, de las cuales la más importante es el mapa de la cuenca de proyecto. También incluye tablas y gráficos resultantes de las simulaciones.

Tabla II.1.- Componentes del HEC-HMS.

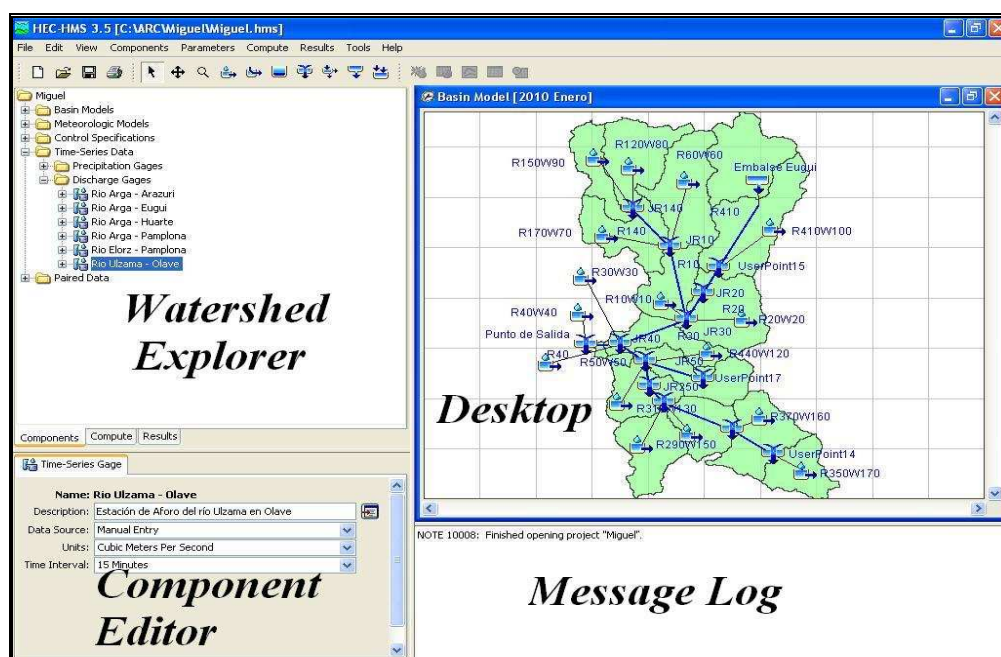


Figura II.1.- Ejemplificación de los componentes del HEC-HMS mediante una captura de pantalla.

La representación y simulación de la cuenca se puede realizar de forma agregada, es decir, considerando la cuenca como una unidad, o de forma distribuida en el sentido de considerar distintas subcuencas, cada una de ellas caracterizada separadamente. En este caso se pueden considerar las cuencas lo suficientemente pequeñas como para tratarlas de forma agregada.

La capacidad básica del *HEC-HMS* en la que se basan todas las demás opciones de computación es la modelación de la red de flujo. Se definen los límites de la cuenca a partir de información topográfica en *ArcView 3.2a*.

Se segmenta la superficie en un número determinado de subcuencas. Se determina así el número y tipo de componentes de la red de flujo, tal y como se muestra en la figura siguiente.

La adecuada subdivisión de la cuenca redonda en una modelización más precisa de la misma, y por tanto en unos mejores resultados.

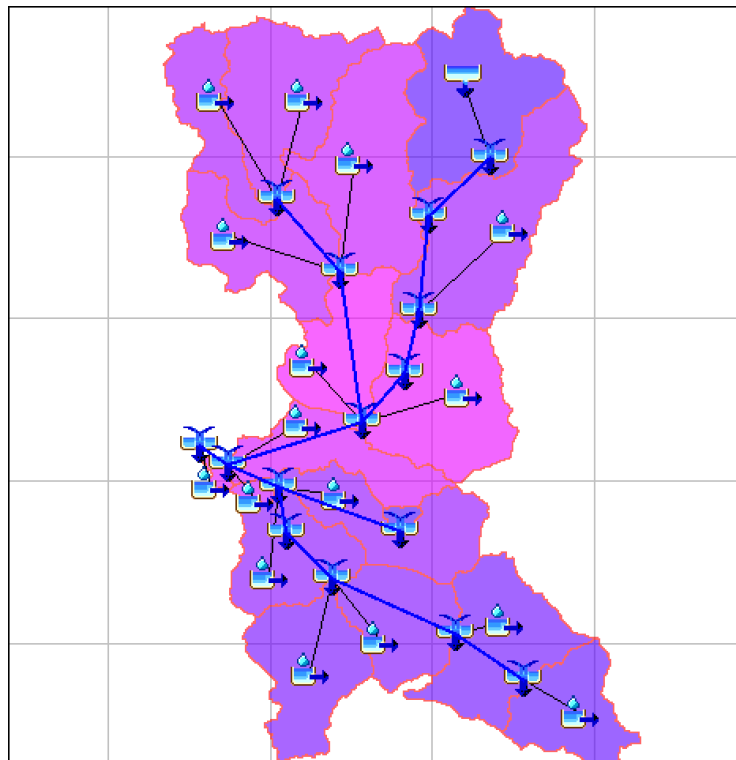


Figura II.2.- Cuenca del proyecto en HEC-HMS.

Cada componente del modelo representa una fase en el proceso de generación y circulación de escorrentía a través de la cuenca. El programa dispone de varias opciones para ejecutar la función de dichos componentes.

Todos los componentes se pueden introducir y modificar en *Watershed Explorer*.

La elección de las metodologías a emplear y el ingreso de parámetros se hacen en la ventana de *Component Editor*.

WATERSHED EXPLORER	COMPONENTE MODELIZADA	METODOLOGÍAS EMPLEADA	
<i>Basin models</i>	<i>Subbasins</i>	<i>Loss method</i>	<i>SCS Curve Number</i>
		<i>Transform method</i>	<i>SCS Unit Hydrograph</i>
	<i>Reaches</i>	<i>Routing method</i>	<i>Muskingum</i>
	<i>Sources</i>	<i>Method</i>	<i>Discharge Gage</i>
		<i>Discharge Gage</i>	<i>Eugui</i>
	<i>Junctions</i>		<i>Ezkoriz</i>
	<i>Outlet point</i>		
<i>Metereologic models</i>	<i>Precipitation model</i>	<i>Gage weights</i>	
<i>Control specifications</i>	<i>Control 1</i>		
<i>Time-series data</i>	<i>Precipitation gages</i>	Estaciones Meteorológicas * * Caso 1: EMAs. * Caso 2: EMAs + EMMs.	
	<i>Discharge gages</i>	Estaciones de Aforo	

Tabla II.2.- Metodología empleada para la modelización en HEC-HMS de la cuenca.

II.1 Basin models.

Esta parte del proyecto indica cómo la información de la cuenca en estudio se introduce en el programa, utilizándola como “Cuenca modelo”. El modelo es responsable de describir las propiedades físicas de la cuenca y del flujo. Es el contenedor de los componentes del modelo que describen infiltración, escorrentía, flujo de base, circulación de flujo, y circulación en embalses. También contiene la información de las confluencias entre los componentes. Generalmente es el punto central de atención para llevar a cabo simulaciones y visualizar los resultados. Su función es convertir las condiciones atmosféricas en flujo. Los elementos hidrológicos se utilizan para dividir la cuenca en secciones. Estas están conectadas dendriticamente para formar una representación del sistema de flujo.

Los elementos hidrológicos son indispensables en una cuenca modelizada. Cada elemento representa un proceso físico y es parte del rendimiento atmosférico total de la cuenca, subcuenca, tramo, embalse, confluencia, desviación-división, fuente o desagüe. Un elemento utiliza un modelo matemático para describir un proceso físico. Pero, en definitiva, el modelo es sólo una buena aproximación del proceso físico original sobre un limitado campo de condiciones medioambientales. La disponibilidad de datos y los parámetros requeridos por el modelo pueden también condicionar su fiabilidad. Para diversos elementos se puede elegir entre una variedad de métodos o modelos según la aproximación que se usa para el proceso físico implicado.

El objeto principal del programa es la derivación del flujo para cada elemento hidrológico incluido en la cuenca modelizada.

- *Flow network*.

Es la estructura que conecta los elementos hidrológicos entre si en una representación del sistema de flujo en una cuenca. Una vez creado el proyecto en *HEC-HMS* mediante las herramientas de *HEC-GeoHMS*, la configuración de la cuenca se carga automáticamente en “*Basin Models*”. En el *Flow Network* es posible elegir los métodos a utilizar en la modelización de la cuenca. Cada vez que se cambia el método, es necesario ingresar los parámetros iniciales requeridos por el mismo.

II.1.1 Junction.

Cada conexión del sistema parte desde un elemento y se conecta con otro, río abajo. Es un elemento con uno o más flujos de entrada y un flujo de salida. Los flujos de entrada se suman entre ellos produciendo el flujo total de salida, asumiendo que el almacenamiento sea nulo. Los hidrogramas generados en las diversas subcuencas se combinan con los que circulan por los cauces en cada punto. Para que la simulación pueda llevarse a cabo es necesario que los datos de las subcuencas sean introducidos en el modelo en el mismo orden que se vayan a usar, es decir, antes de combinar los flujos en un determinado punto es necesario que todos los flujos que convergen a dicho punto hayan sido calculados y direccionado hasta el mismo.

El objetivo fundamental de la modelización es, principalmente, la derivación de caudales. Este componente representa bifurcaciones de canales, derivaciones o cualquier transferencia de caudal desde un punto de la cuenca hacia otro punto dentro o fuera de la misma cuenca.

II.1.1.1 Balsa de Ezkoriz.

La balsa de Ezkoriz, tal y como se ha comentado anteriormente en la descripción física de la cuenca, es como un depósito porque se ha visto que su comportamiento no respondía al de un embalse, sino que actuaba como un ‘pozo’. Por lo tanto, toda el agua perteneciente a esta pequeña cuenca no se la ha considerado en la cuenca del proyecto.

Dentro del punto “Balsa de Ezkoriz” de la Memoria, se detallan las características de esta masa de agua.

II.1.2 Subbasin.

Una subcuenca es un elemento que normalmente no tiene flujo de entrada y sólo presenta un punto de salida. Produce flujo en el modelo de la cuenca. El flujo de salida se calcula a partir de datos meteorológicos mediante substracción de pérdidas, transformación de la excedencia de precipitaciones, y adición del flujo en entrada.

La subcuenca puede utilizar como modelo una amplia variedad de metodologías. En este proyecto se ha utilizado como método de pérdida (Loss method) el *Método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (SCS Curve Number)* y como método de transformación lluvia-escorrentía (Transform method) el *Hidrograma Unitario Adimensional del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (SCS Unit Hydrograph)*.

II.1.2.1 Loss Method.

Las abstracciones incluyen la intercepción de la lluvia por la vegetación, el almacenamiento superficial en el terreno y la infiltración del agua en el suelo. Hay que tener en cuenta que la precipitación efectiva es la fracción de la precipitación total que se transforma en escorrentía directa, por lo tanto, el resto de la precipitación es considerada como pérdidas.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que las ecuaciones usadas para computar dichas pérdidas no tienen en cuenta la variación del contenido de humedad del suelo ni la posibilidad de recuperar el agua almacenada en la superficie. La suma de infiltración y precipitación que permanece en la superficie, será siempre igual al total de la precipitación caída.

Siempre que una subcuenca conceptual represente infiltración, escorrentía y procesos de escurrimiento subterráneo, el cálculo de la infiltración actual se lleva a cabo mediante un método de pérdida contenido dentro de la subcuenca.

La separación de la lluvia efectiva que va a ser utilizada para la determinación del hidrograma de escurrimiento puede realizarse mediante diferentes algoritmos. En total se puede elegir entre 10 métodos diferentes de pérdida. En este trabajo se ha utilizado el *Método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS CN)*.

SCS Curve Number Loss

El Método del Número de Curva fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) para el cálculo de las pérdidas en un suceso de lluvia (NRCS, 2004).

En cualquier tormenta la precipitación efectiva P_e es siempre menor o igual a la precipitación total, P . De la misma manera, una vez que la escorrentía se inicia, la cantidad de agua adicional retenida en el suelo, F_a , es menor o igual a una retención potencial máxima, S .

Al principio de la precipitación, existe una cierta cantidad de la misma que no produce escorrentía, denominada abstracción inicial, I_a , luego la escorrentía potencial es $P-I_a$.

El método del SCS se basa en la hipótesis siguiente:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (\text{II.1})$$

De la ecuación de continuidad,

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (\text{II.2})$$

Combinando y resolviendo para P_e se obtiene que,

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (\text{II.3})$$

Se considera una pérdida inicial, I_a , igual a la cantidad de precipitación que no produce escurrimiento al inicio de la tormenta. Del estudio de multitud de cuencas realizadas en los Estados Unidos, se concluyó que I_a se puede considerar como el 20% de las pérdidas potenciales máximas, es decir, que $I_a = 0,2S$, con lo que:

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (\text{II.4})$$

A partir de esta ecuación se pueden trazar curvas que relacionen el escurrimiento directo acumulado con la precipitación total. El valor de pérdida potencial inicial máxima S se relaciona con un parámetro que se denomina número de curva (CN) de la forma:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (\text{II.5})$$

El número de curva está relacionado con S por la expresión:

$$CN = \frac{1000}{10 + S} \quad (\text{II.6})$$

Dicho parámetro depende de diversos factores: Tipo de suelo, uso del suelo y condición de humedad antecedente. Los valores del mismo están tabulados en función de estas variables.

II.1.2.2 Transform method.

Para el cálculo de la escorrentía superficial. Este componente simula el movimiento del agua a través de la superficie y por los canales. El dato de partida es un yetograma de precipitación efectiva, o exceso de precipitación, obtenido mediante la sustracción de pérdidas al yetograma de precipitación real.

Tanto la precipitación como la infiltración se consideran uniformes a lo largo de la superficie de la subcuenca. La precipitación efectiva es direccionada mediante distintos métodos, como el del hidrograma unitario o de la onda cinemática, hasta la salida de la subcuenca produciendo un hidrograma de escorrentía.

Para obtener el hidrograma de salida de la cuenca es necesario combinar el hidrograma de escorrentía superficial con el flujo base, el cual, se calcula empíricamente a partir de los datos introducidos por el usuario.

El Hidrograma Unitario

El hidrograma unitario de una cuenca se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de una unidad de exceso de precipitación, o precipitación efectiva, generado uniformemente sobre el área de drenaje y a una intensidad constante a lo largo de una duración efectiva (Chow, 1994).

La utilidad del hidrograma unitario es que es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia. Esta técnica es usada para transformar el exceso de precipitación generada en la misma en flujo superficial o caudal saliente de dicha cuenca. Se basa en una serie de suposiciones básicas:

- El exceso de precipitación tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva.
- El exceso de precipitación está uniformemente distribuido a través de toda el área de drenaje.
- Las ordenadas de los hidrogramas de escorrentía directa de igual tiempo base son directamente proporcionales a las intensidades de lluvia efectiva representada por cada hidrograma. (Principio de Linealidad).
- La duración del hidrograma de escorrentía directa resultante de excesos de lluvia de duración constante, permanece invariable, independientemente de la intensidad de lluvia.
- El hidrograma resultante de un yetograma, con varios periodos con distinta intensidad, es la suma de los hidrogramas correspondientes a cada periodo.

En condiciones naturales, todas estas suposiciones no se cumplen perfectamente, pero normalmente los resultados obtenidos por este método tienen una precisión aceptable.

El modelo admite la introducción de hidrogramas por parte del usuario y el uso de hidrogramas sintéticos.

Los Hidrogramas Unitarios Sintéticos

Con la técnica del hidrograma unitario, el exceso de precipitación en una cuenca se transforma en escorrentía según la ecuación de convolución. Si tenemos valores registrados de precipitación y caudal representativos de una cuenca se podrán calcular las componentes del hidrograma unitario. Los parámetros necesarios para el uso de los hidrogramas unitarios pueden ser determinados mediante el uso de datos registrados o por la opción de calibración de parámetros disponible en el modelo.

Sin embargo estos parámetros deben ser siempre determinados regionalmente, ya que su valor depende de las características propias de cada cuenca. Lo más habitual, de cualquier forma, es que no dispongamos de datos de aforo por lo que en ese caso se recurre a los hidrogramas unitarios sintéticos como el *Hidrograma unitario adimensional del SCS*.

- *SCS Unit Hydrograph Transform.*

El *Hidrograma Unitario Adimensional del SCS* es un hidrograma unitario sintético en el cual se representa la relación entre q/q_p , es decir el caudal q con respecto al caudal pico q_p , y t/T_p , o lo que es lo mismo la fracción del tiempo t con respecto al tiempo de ocurrencia del pico en el hidrograma unitario, T_p (Cazorzi, 1983).

Dados el caudal pico y el tiempo de retardo para la duración de exceso de precipitación, el hidrograma unitario puede estimarse a partir del hidrograma sintético adimensional para la cuenca dada. Los valores de q_p y T_p pueden estimarse utilizando un modelo simplificado de hidrograma unitario triangular.

Con base en la revisión de un gran número de hidrogramas unitarios, el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos ha sugerido que el tiempo de recesión puede aproximarse a $1,67 \cdot T_p$. Como el área bajo el hidrograma unitario debería ser igual a una escorrentía directa de 1 cm., puede demostrarse que:

$$q_p = \frac{CA}{T_p} \quad (\text{II.7})$$

En donde:

- $C \rightarrow 2,08$
- $A \rightarrow \text{Área de drenaje, en kilómetros cuadrados (Km}^2\text{)}.$

Además se establece que el tiempo de retardo es aproximadamente $t_c \cong 0,6 \cdot T_c$, donde T_c es el tiempo de concentración de la cuenca. El tiempo de ocurrencia del pico de caudal T_p puede expresarse en función del tiempo de retardo, t_p , y de la duración de la lluvia efectiva, t_r ,

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (\text{II.8})$$

El tiempo de retardo se ha estimado utilizando la función *CN Lag method*, un doble proceso (NRCS, 2004).

En la primera parte del mismo se ha estimado la pendiente de cada subcuenca, mientras que en la segunda se ha utilizado la fórmula de Victor Mockus del Método del Número de Curva (CN) para llevar a cabo el cálculo del *Lag time* en horas de cada subcuenca:

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{2.92Y^{0.5}} \quad (\text{II.9})$$

En donde:

- $T_{lag} \rightarrow \text{Lag Time de la subcuenca, en horas.}$
- $L \rightarrow \text{Largura fluvial hasta la divisoria, en kilómetros.}$

- CN → Número de Curva medio de la subcuenca.
- Y → Pendiente fluvial, en %.

II.1.2.3 Parámetros subcuencas.

Los parámetros requeridos para que el modelo utilice correctamente el método del SCS son el *CN* medio de cada subcuenca y las *Abstracciones Iniciales*. El único parámetro requerido por parte del método del hidrograma adimensional del SCS es el *Tiempo de Retardo (Lag Time)* medio de cada subcuenca. Los tres parámetros se han calculado en *ArcView 3.2a* y se muestran en la siguiente tabla:

NAME	AREA (Km ²)	CN	I _A	LAG_TIME
R10W10	43,618	69	0,899	26,400
R20W20	67,716	69	0,899	26,040
R30W30	39,451	85	0,353	23,160
R40W40	2,341	85	0,353	6,300
R50W50	3,246	85	0,353	7,320
R60W60	74,530	62	1,226	33,300
R170W70	52,553	65	1,077	28,500
R120W80	61,437	64	1,125	32,280
R150W90	32,739	66	1,030	25,800
R410W100	83,099	62	1,226	37,380
R440W120	45,535	80	0,500	21,960
R310W130	41,029	81	0,469	16,200
R340W140	40,997	78	0,564	18,060
R290W150	50,085	76	0,632	20,220
R370W160	56,328	73	0,740	17,040
R350W170	37,076	70	0,857	16,080
R390W180	68,836	61	1,279	23,340
R420W190	2,866	81	0,469	4,500

Tabla II.3.- Parámetros iniciales de las subcuencas.

II.1.3 Reach.

Los tramos de ríos están conectados entre si por parte de las confluencias. Para el cálculo de la circulación en ríos, el dato de partida es un hidrograma generado aguas arriba, normalmente en una subcuenca. Si en el estudio de la escorrentía superficial se usa el método de la onda cinemática, al circular el hidrograma por un canal que atraviesa otra subcuenca, la escorrentía generada en dicha subcuenca se combina con el hidrograma circulante a lo largo de todo el canal principal. El modelo HEC-HMS dispone de varios métodos para la propagación de avenidas que se detallan más adelante.

II.1.3.1 Routing Method.

Existen varios criterios para clasificar los métodos de tránsito. Los más prácticos los clasifican en modelos de proceso, frecuentemente llamados métodos hidráulicos, y los modelos que usan un enfoque conceptual, denominados comúnmente como métodos hidrológicos.

Los desarrollos recientes en el campo de las técnicas numéricas y la accesibilidad a ordenadores cada vez más eficientes, han conducido a un mayor uso de los métodos hidráulicos, los cuales han alcanzado un alto nivel de perfección. Sin embargo, sus altas demandas en cantidad y calidad de los datos necesarios, así como en recursos computacionales, restringen su eficiencia en las aplicaciones prácticas y de carácter simple.

Por su parte, los métodos hidrológicos producen resultados menos costosos y rápidos, pero limitados en exactitud y generalización, pues únicamente son confiables donde han sido previamente calibrados.

El tránsito de avenidas permite determinar el tiempo y la magnitud del caudal en un punto de un curso de agua utilizando hidrogramas conocidos en uno o más puntos aguas arriba. Dependiendo de las características del sistema hidrológico por el cual va a ser transitada la avenida existen varios métodos de tránsito.

Muskingum Method

La técnica hidrológica más difundida para manejar relaciones variables de descargas-almacenamientos es el método de Muskingum (Chow, 1994). Éste es un método de tránsito hidrológico que se emplea normalmente en situaciones donde la relación caudal-almacenamiento es variable.

Este método modela el almacenamiento volumétrico de crecientes en canales de ríos mediante la combinación de los almacenamientos de cuña y de prisma.

Durante el avance de la onda de la creciente el caudal entrante en un tramo del río es mayor que el de salida; a este almacenamiento se le denomina en cuña. Durante la recesión, el caudal de salida es mayor que el entrante, produciéndose una cuña negativa.

Adicionalmente aparece un almacenamiento en prisma formado por el volumen de agua que se encuentra en el tramo del río.

Suponiendo que el área de la sección transversal al flujo de la corriente es directamente proporcional al caudal en la sección, el volumen de almacenamiento por cuña es igual a KQ , donde K es un coeficiente de proporcionalidad. El volumen de almacenamiento en cuña supone entonces que $KX(I-Q)$, donde X es un factor de ponderación que se sitúa dentro del rango $0 < X < 0,5$.

El almacenamiento total surge de la suma de los dos componentes,

$$S = KQ + KX(I-Q) \quad (\text{II.10})$$

Reordenando la expresión se puede obtener la función de almacenamiento del método de Muskingum:

$$S = K[XI + (1 - X)Q] \quad (\text{II.11})$$

El valor de X depende de la forma del almacenamiento en cuña modelado, así X va desde 0 para un almacenamiento tipo embalse en los cuales se supone que no se produce el efecto de la cuña, hasta 0,5, en el caso de que exista una cuña perfectamente definida. En corrientes naturales el valor de X es próximo a 0,2, no siendo necesario que se determine su valor exacto ya que el resultado de este método es relativamente insensible al valor de este parámetro. K es el tiempo de tránsito de la onda de creciente a lo largo del tramo del canal.

Suponiendo que el valor de los parámetros K y X son constantes a lo largo de la longitud del tramo considerado, los valores de almacenamiento en los instantes j y $j+1$ pueden escribirse como:

$$S_j = K[XI_j + (1 - X)Q_j] \quad (\text{II.12})$$

$$S_{j+1} = K[XI_{j+1} + (1 - X)Q_{j+1}] \quad (\text{II.13})$$

La variación del almacenamiento a lo largo del intervalo es:

$$S_{j+1} - S_j = K\{[XI_{j+1} + (1 - X)Q_{j+1}] - [XI_j + (1 - X)Q_j]\} \quad (\text{II.14})$$

El cambio en el almacenamiento puede expresarse también como:

$$S_{j+1} - S_j = \frac{(I_j + I_{j+1})}{2} \Delta t - \frac{(Q_j + Q_{j+1})}{2} \Delta t \quad (\text{II.15})$$

Combinando las ecuaciones obtenidas y simplificando, se obtiene

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j \quad (\text{II.16})$$

Esta última es la ecuación de tránsito para el método de Muskingum, donde:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t}; C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1 - X) + \Delta t}; C_3 = \frac{2K(1 - X) - \Delta t}{2K(1 - X) + \Delta t} \quad (\text{II.17})(\text{II.18})(\text{II.19})$$

Nótese que:

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1. \quad (\text{II.20})$$

II.1.3.2 Parámetros de los ríos.

Los parámetros requeridos en HMS para la utilización del método Muskingum son K , x y el número de subtramos. La estimación convencional (gráfica) de los parámetros K y x del método de Muskingum es bastante subjetiva. Para asignar correctamente estos valores se ha hecho una comparación con el “*Estudio hidráulico del río Arga en la comarca de Pamplona*” (Ayuntamiento de Pamplona, 1998). La estimación utilizada para este trabajo ha resultado adecuada. En caso de carencia de datos, los parámetros K y x se calculan estimándolos a partir de los datos de este trabajo. En particular los datos de K ciertos de la cuenca de proyecto se refieren a la zona cercana la ciudad, para los tramos R20 y R30.

NAME	LENGHT	K (h)	Kx3600 = K(sec)	c = L/K
R20	4106,700	1,000	3600,000	1,141
R30	14123,900	3,000	10800,000	1,308

Tabla II.4.- Parámetros conocidos.

La estimación del parámetro K para los tramos de las otras cuencas se obtienen con la fórmula:

$$K = \frac{L}{c} \times \frac{1}{3600} \quad (\text{II.21})$$

El dato de la longitud de los tramos era conocido. En la asignación de la celeridad se ha tenido en cuenta pendientes medias de los tramos y caudales medios de los mismos. Por ejemplo el tramo de Pamplona tiene una celeridad más elevada que el tramo antes de la confluencia con el río Ulzama porque el aumento de caudal hace que la velocidad aumente. En este sentido se ha calculado un aumento progresivo de la celeridad del agua en las cuencas más al norte de Pamplona, porque la pendiente es mayor.

La velocidad máxima del agua en la cuenca se ha asumido como 2 m/seg. Este dato se refiere a la velocidad máxima del agua en la cuenca por el periodo de retorno de los eventos que se consideran (25 años). Este se ha obtenido del trabajo “*Estudio hidráulico del río Arga en la Comarca de Pamplona*” (Ayuntamiento de Pamplona, 1998).

Es necesario indicar también el número de subtramos de cada tramo. Este dato afecta la atenuación. Por ejemplo, el aumento del número de subtramos disminuye la atenuación.

Para la aproximación de este parámetro se ha dividido la longitud de cada tramo por el producto de celeridad y tiempo de simulación elegido. Se ha transformado el valor de Dt de minutos a segundos, para la obtención del número de subtramos en metros. Los datos se pueden ver en la tabla que se muestra a continuación.

$$Subr = \frac{L}{c \times \Delta t \times 60}$$

NAME	RIV_LENGTH	C (m/s)	X	K (h)	SUBREACHES
R10	14119,300	1,5	2,6	2,6	16
R20	4106,700	1,1	1	1,0	6
R40	2894,000	1,3	0,6	0,6	4
R30	14123,900	1,3	3	3,0	18
R50	3529,900	1,5	0,6	0,7	4
R140	6447,700	1,5	1,2	1,2	7
R200	8309,100	1,1	2	2,1	13
R250	4748,100	1,1	1,1	1,2	7
R280	4437,000	1,1	1	1,1	7
R340	15309,800	1,3	3,2	3,3	20
R370	6241,600	1,1	1,5	1,6	9
R380	10863,700	1,5	2	2,0	12
R410	3661,000	1,5	0,7	0,7	4
R440	10742,900	1,1	2,6	2,7	16

Tabla II.5.- Parámetros iniciales de Muskingum.

II.1.4 Source.

Un embalse es un elemento que tiene uno o más flujos de entrada y un único flujo de salida. El flujo de entrada proviene de otros elementos de la cuenca del proyecto. Si presenta más de un flujo de entrada, todo se suma antes de calcular el flujo de salida. Se asume que la superficie del agua en el fondo/reserva del embalse es el nivel. Para el cálculo de la circulación a través de embalses, su funcionamiento es similar al componente anterior. Básicamente consiste en direccionar un caudal a través del embalse mediante uno de los métodos disponibles en el HEC-HMS. El flujo de salida del embalse es únicamente una función del almacenamiento del mismo o de la altura de la lámina de agua y no depende de controles aguas abajo.

Existen muchos métodos para definir las propiedades de almacenamiento de un embalse. Mientras que un embalse conceptualmente representa un lago o un lago detrás de una presa, los cálculos que simulan el almacenamiento se hacen mediante un método de tránsito del flujo contenido en el embalse. Se puede elegir entre tres métodos. Todos los métodos requieren el conocimiento de las condiciones iniciales. Son requeridas también las características de almacenamiento del embalse. Los parámetros iniciales que se tiene que agregar a los datos de medida del embalse dependen del método de almacenamiento elegido.

Una fuente (Source) es un elemento sin flujo de entrada y con un flujo de salida. Normalmente se suele utilizar para la modelización de condiciones medias del modelo de subcuenca como flujos de salida medidos de embalses o regiones de la cuenca no modelizadas, para las cuales se tienen medidas reales. El flujo de salida puede ser modelizado asumiendo caudal constante o utilizando series temporales de datos de descarga.

II.1.4.2 Embalse de Eugui.

Para que un embalse pueda cumplir funciones reguladoras, es necesario que su capacidad de embalse supere al menos el 50 % de la aportación anual.

No es el caso del embalse de Eugui, cuya capacidad útil de poco más de 20 Hm³ supone un 18 % de la aportación. Se trata, además, de un embalse dedicado al abastecimiento de Pamplona. La ciudad ha sufrido como consecuencia de su expansión problemas de escasez de agua para su abastecimiento.

Este hecho obliga a mantener la capacidad de almacenamiento al máximo, quedando anulada por completo la capacidad reguladora del embalse. Aunque su importancia no sea fundamental en la regulación del río, se ha caracterizado la cuenca vertiente al embalse de Eugui de manera separada.

Para el embalse de Eugui se disponía de los datos horarios de caudal de los eventos simulados. Por eso se ha modelizado el embalse utilizando el elemento *Source* a la vez que *Reservoir*. La selección de un indicador de medida de descarga representa una medida real del flujo de salida por un determinado periodo de tiempo y tiene que ser cargado como serie temporal en *Time Series Data*. De esta manera no es necesario adicionar parámetros a los datos de medida del embalse, porque no hace falta modelizar el sistema de almacenamiento. En la descripción de la cuenca, dentro del punto “Embalse de Eugui”, se detalla las características de esta masa de agua.

II.2 Metereologic models.

Los modelos meteorológicos calculan los datos iniciales de precipitaciones para cada subcuenca. Un modelo meteorológico puede utilizar tanto puntos como mapas de precipitaciones, y tiene la capacidad de modelizar hielo y precipitación líquida junto con evapotranspiración.

II.2.1 Precipitation models.

La precipitación tiene que ser introducida en el modelo mediante un yetograma, que es la gráfica que representa los valores de precipitación registrados o estimados para cada intervalo de tiempo. Esta precipitación se supone uniforme en la zona asignada a cada estación. Los datos de precipitación para una tormenta dada pueden ser suministrados al programa de dos maneras:

- La primera supone añadir la precipitación media sobre la cuenca. Consiste en introducir en el modelo una cantidad de precipitación total uniforme para cada subcuenca y una distribución temporal de la misma.
- La segunda consiste en la ponderación de las precipitaciones determinadas. La precipitación total para cada subcuenca puede ser estimada como una media ponderada de precipitaciones, para un mismo evento de tormenta, medidas en distintas estaciones representativas de la precipitación de dicha subcuenca.

En este modelo se ha utilizado el segundo tipo de suministro de datos.

Para el estudio del proceso precipitación-escorrentía podemos recurrir a tormentas históricas o tormentas de diseño. En este caso como lo que se pretende es calibrar el modelo hidrológico se utilizarán tormentas o eventos históricos. Este tipo de información consiste en estudiar lluvias concretas determinando la cantidad de lluvia y la distribución temporal de las mismas. Para que los datos obtenidos sean representativos de las lluvias en estudio se suele recurrir a duraciones de intervalo cortas (Ej. Diezminutales).

Gage Weights

Estudiando las precipitaciones sobre áreas de un cierto tamaño nos encontramos que la distribución espacial de la misma no es uniforme, sino variable. En la zona en estudio disponemos de varias estaciones meteorológicas (Automáticas y Manuales), entonces para un mismo evento de precipitación obtendremos distintos registros de lluvia.

Para determinar la cantidad de lluvia caída sobre la zona se debe promediar la cantidad registrada en las distintas estaciones. Para este cálculo se ha utilizado el método de los polígonos de Thiessen calculados en *ArcView*, tal y como se ha explicado en uno de los apartados anteriores.

Se ha dividido la cuenca en tantos polígonos como estaciones disponibles (**Caso 1: Sólo las EMAs** y **Caso 2: EMAs y EMMs**), de manera que la precipitación caída sobre la región resulta ser la media ponderada de las registradas en las distintas estaciones en función del área que ocupe su polígono respecto de la superficie total.

Una vez creada la base de datos para cada estación se debe delinear para cada subcuenca los pluviógrafos que contribuyen y sus correspondientes coeficientes. En la tabla *Gage Selection* se determina cual de las estaciones pertenecen a cada subcuenca.

Gage Selections	
Gage Weights	
Element Name: R10W10	
Gage Name	Use Gage
EMA Arazuri	No
EMA Beortegi	No
EMA Doneztebe-Santesteban	No
EMA El Carrascal	No
EMA El Perdon-Erreniaga	No
EMA ETSIA UPNA (Pamplona)	No
EMA Getadar	No
EMA Ilundain	No
EMA Larrabide (Pamplona)	Yes
EMA Noain	No
EMA Oskotz	No
EMA Roncesvalles-Oreaga	No
EMM Belate	No
EMM Belzunce	Yes
EMM Erro	No
EMM Eugui	No
EMM Iraizotz	No
EMM Irotz	Yes
EMM Monreal	No
EMM Olague	Yes
EMM Zalba	No
EMM Zuazu	No
EMM Zubiri	Yes

Estas estaciones aparecen en la tabla *Gage Weights* en la cual se colocan los valores de los pesos calculados en *ArcView*.

De esta manera el modelo calcula la precipitación media ponderada en cada intervalo de tiempo para cada subcuenca.

Figuras II.3 y II.4.- Captura de pantalla de una de las cuencas donde se aprecia las estaciones meteorológicas que intervienen, así como el peso de cada una.

Gage Selections	
Gage Weights	
Element Name: R10W10	
Gage Name	Depth Weight
EMA Larrabide (Pamplona)	0,1075
EMM Belzunce	0,2574
EMM Irotz	0,5701
EMM Olague	0,0634
EMM Zubiri	0,0016

II.3 Time-Series data.

Las simulaciones hidrológicas requieren condiciones iniciales, condiciones medias o parámetros. Los datos de series temporales observados son de importancia fundamental en la calibración del modelo y su optimización. Las series temporales de datos se guardan en el proyecto como datos de medida (*Gages*).

II.3.1 Precipitation gages.

Una vez calculados los polígonos de Thiessen es necesario recopilar las informaciones obtenidas en el modelo, poniendo la fecha en *Time Window* y recopilando con la información de lluvia diezminutal obtenida. Se ha creado una base de datos para cada evento en cada estación meteorológica, tal y como se muestra en la tabla siguiente:

ELEMENTO	FINALIDAD	DATOS
<i>Data source</i>	Determina cómo los datos de una serie temporal se van a guardar. La tipología de propiedades especificadas para las series de datos se determinan por las secciones de tiempo. También indica qué tipología de lluvia vamos a utilizar	Entrada manual de los datos. Datos diezminutales. Unidades en mm. de precipitaciones
<i>Time window</i>	Ventana temporal en que se desarrollan los eventos elegidos	10/03/'06 00:00 13/03/'06 00:00 01/04/'07 00:00 04/04/'07 00:00 25/01/'09 00:00 30/01/'09 00:00 09/02/'09 00:00 14/02/'09 00:00 12/01/'10 00:00 16/01/'10 00:00
<i>Table</i>	Tabla en que se adjuntan los valores de lluvia de la estación. La tabla esta hecha según los Intervalos de fechas elegidos en <i>Time window</i> .	
<i>Graph</i>	Para cada estación se obtiene automáticamente el grafico de la lluvia cargada.	

Tabla II.6.- Datos para las Estaciones Meteorológicas (*Precipitation Gages*).

Estas operaciones tienen que ser repetidas para cada estación utilizada en Thiessen y para cada evento modelizado, añadiendo correctamente los valores.

Es de destacar que, para la estación de Arazuri no se disponía de medidas de precipitaciones diezminutales, por lo que se han utilizado valores de lluvia cada media hora. La interpolación de los datos no provoca problemas, aunque la precisión de la información sea menor.

II.3.2 Discharge gages.

El tratamiento de los embalses tiene que ser hecho de manera distinta que el realizado en las otras subcuencas.

La subcuenca del embalse se ha caracterizado mediante el uso de caudales medidos por las fechas de las avenidas de proyecto. Las series de datos para Eugui han sido obtenidas de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE).

En este caso y de forma similar a las estaciones de precipitación (*Precipitation gages*), se ha realizado una base de datos para cada evento en la estación de aforo del embalse de Eugui, tal y como se muestra en la tabla siguiente.

ELEMENTO	FINALIDAD	DATOS
<i>Data source</i>	Determina cómo los datos de una serie temporal se van a guardar. La tipología de propiedades especificadas para las series de datos se determinan por las secciones de tiempo. También indica qué tipología de lluvia vamos a utilizar.	Entrada manual de los datos. Datos quinceminutales. Unidades en m ³ /seg.
<i>Time window</i>	Ventana temporal en que se desarrollan los eventos elegidos.	10/03/'06 00:00 13/03/'06 00:00 01/04/'07 00:00 04/04/'07 00:00 25/01/'09 00:00 30/01/'09 00:00 09/02/'09 00:00 14/02/'09 00:00 12/01/'10 00:00 16/01/'10 00:00
<i>Table</i>	Tabla en que se adjuntan los valores de caudal de la estación. La tabla esta hecha según los Intervalos de fechas elegidos en <i>Time window</i> .	
<i>Graph</i>	Para cada estación se obtiene automáticamente el grafico del caudal del embalse de Eugui para cada evento.	

Tabla II.7.- Datos para la Estación de Aforo (*Discharge Gage*).

Toda la información y detalles acerca de las estaciones utilizadas, tanto meteorológicas (*Precipitation gages*), como de aforo (*Discharge gages*), se puede encontrar en el apartado de descripción de la cuenca, dentro del punto “2.3.- Estaciones de medida”.

II.4 Control specifications

Las especificaciones de control son unos de los componentes más importantes del proyecto, aunque no contengan muchos datos. Su función es controlar cuándo comienza y termina la simulación, y qué intervalo temporal se emplea en la simulación.

- *Time Windows.*

Cada *Control Specification* asigna la ventana de tiempo en la cual se llevará a cabo la simulación. El que una simulación se considere puntual o continua, depende de la longitud de la ventana temporal, de los requisitos de control y de los métodos elegidos en el modelo.

- *Time Interval.*

Cada requisito de control incluye el intervalo de tiempo que va a ser utilizado para llevar a cabo los cálculos de la simulación. Los cálculos pueden ser realizados por un intervalo de tiempo más corto y los resultados interpolados con el intervalo específico de los requisitos de control.

Algunos métodos en el modelo de la cuenca utilizan parámetros sensibles al intervalo de tiempo. Estos parámetros tienen que ser estimados mediante conocimiento del intervalo de tiempo asumido en los requisitos de control.

Durante la simulación, las series de datos de medida y de la red son interpolados con el intervalo de tiempo. Los datos originales no son alterados. La interpolación se realiza linealmente en el tiempo con los datos disponibles. Para ello, los gráficos obtenidos con la simulación representan datos continuos. La interpolación lineal se utiliza cuando una variable dependiente es requerida como independiente entre dos valores específicos. La interpolación se hace entre los valores independientes que corresponden al valor independiente medio más cercano a cada lado del valor requerido.

En este proyecto se han empleado, inicialmente, diferentes intervalos de tiempo, para determinar eventuales incongruencias entre los resultados. El intervalo temporal adoptado ha sido de diez minutos y las fechas de inicio y fin corresponde a la duración del evento adoptado.

II.5 Ejecución y resultados en el modelo.

Una vez que se tiene el modelo con todos los datos y parámetros dispuestos, se ejecutan las simulaciones pertinentes y se visualizan los resultados que ofrece el modelo. A continuación se describe la forma de realizar dichas acciones en el modelo.

II.5.1. Simulation Run.

En la ventana *Compute* de *Watershed Explorer* es necesario, previamente, indicar el modelo de la cuenca, el modelo meteorológico y las especificaciones de control que tienen que ser utilizadas en la simulación. Una vez caracterizadas todas las componentes, es posible hacerlo funcionar. Para empezar la simulación se utiliza la función específica *Simulation Run*. El programa lleva a cabo la simulación sólo si todos los componentes están correctamente definidos y el intervalo temporal es el adecuado.

Los resultados de la simulación están disponibles siempre que ninguno de los datos o parámetros de la cuenca del proyecto se cambie. Es así que, cada vez que se cambia el valor de un dato es necesario reiniciar la simulación.

En la ventana *Message Log* se muestran todas las notas y atenciones sobre el tratamiento del modelo. También es posible visualizar eventuales errores ocurridos durante la simulación. Esto resulta de ayuda en el tratamiento del modelo y en el análisis de los resultados obtenidos.

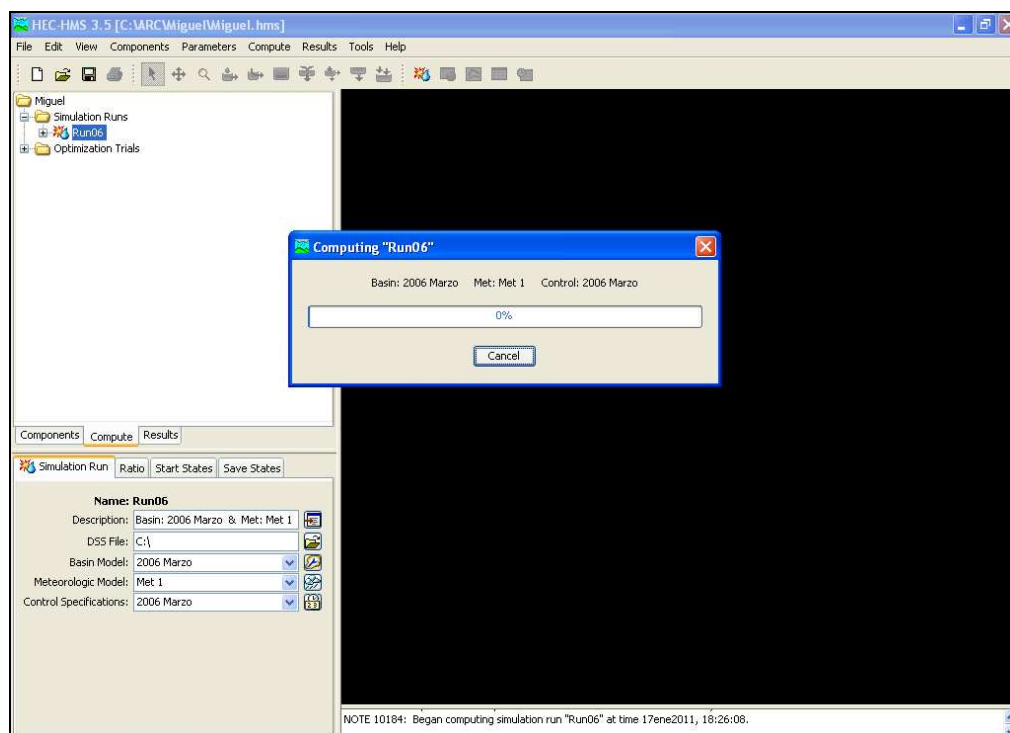


Figura II.5.- Captura de pantalla de la simulación de la avenida de 2006.

II.5.2. Visualización y control de los resultados.

Una vez ejecutado el proyecto, los resultados obtenidos para cada una de las operaciones realizadas se pueden visualizar tanto en forma gráfica como tabular. Ejecutando *Simulation Run* el programa calcula el caudal según el evento elegido. La calibración de los parámetros se hace variando los valores de los mismos y comparando gráficamente y estadísticamente el hidrograma resultante de la simulación con el calculado, que sirve de orientación sobre la bondad de la calibración.

II.5.2.1. Global Summary Results

La forma general para la visualización de los resultados es la tabla *Global Summary Results*. Se puede visualizar desde la ventana *Results* de *Watershed Explorer*. Para cada elemento de la cuenca del proyecto se determina una fila. En las columnas se incluyen el nombre de cada elemento (*Hydrologic Element*), su área de drenaje (*Drainage Area*), el flujo máximo (*Peak Discharge*), el tiempo del flujo máximo (*Time of Peak*), y el volumen total de salida (*Volume*), tal y como se muestra en la siguiente figura.

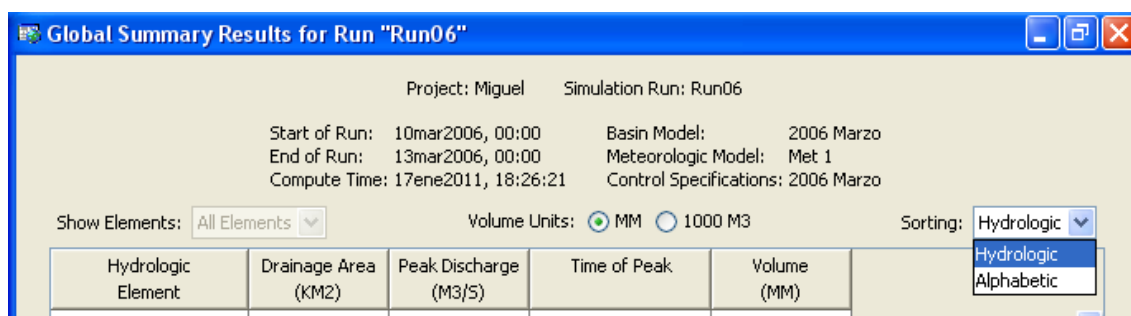


Figura II.6.- Captura de pantalla con el detalle del encabezamiento de la tabla *Global Summary*.

Se observa, inicialmente, los resultados globales para comprobar que el modelo esté trabajando correctamente. En la tabla *Global Summary Results* es posible controlar si, para cada elemento, la simulación se llevó a cabo.

Tal es así, que se puede ver si para algún elemento, los cálculos no se desarrollaron. En este caso y para la cuenca del proyecto, hay ciertos elementos que no están incluidos en los cálculos, los cuales son:

- R440 es el tramo de río que pertenece a la confluencia que se refiere a la pequeña subcuenca del depósito producido por la balsa de Ezkoriz, para la cual no se genera flujo.
- R410, R380 y la confluencia JR380 se refieren a los tramos de río que parten desde el embalse de Eugui. Resulta entonces normal que no se haya producido un flujo adicional al caudal del embalse, para el cual se tiene el dato medido.

II.5.2.2. Hidrogramas de caudal.

Un hidrograma de caudal es una gráfica en la que se representa el caudal de un lugar concreto de la corriente en función del tiempo. El hidrograma es "una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje particular" (Chow, 1994).

Generalmente los hidrogramas se suelen determinar en las salidas de las cuencas, ya que son en estos puntos donde se producen los caudales más importantes de las cuencas. Existen dos tipos de hidrogramas especialmente importantes: el anual y el de tormenta.

Hidrograma de tormenta.

Los hidrogramas de tormenta son el resultado de tormentas individuales. Antes de que la escurrentía directa llegue a la corriente, el caudal circulante se debe al flujo base. El hidrograma comienza cuando el caudal circulante empieza a disminuir. Se sabe que esta disminución se produce de forma exponencial según la siguiente ecuación:

$$Q(t) = Q_0 e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (\text{II.22})$$

En donde:

- Q_0 → Caudal inicial.
- Δt → Tiempo transcurrido desde el comienzo de la recesión.
- k → Constante de decrecimiento.

La recesión se detiene donde comienza la escurrentía directa, la cual dura hasta el comienzo del nuevo decrecimiento exponencial. La recesión del flujo base viene dada al considerarse la cuenca como un almacenamiento lineal y la tasa de salida del mismo es función del almacenamiento en cada momento. Los parámetros más importantes de los hidrogramas de tormenta son el *Tiempo de Concentración* (T_c) y el *Tiempo del Pico* (T_p). Se define el *Tiempo de Concentración* de un hidrograma como el tiempo que tarda en salir de la cuenca la última gota de lluvia y el *Tiempo del Pico* como el intervalo de tiempo entre el comienzo de la escurrentía directa y el máximo caudal del hidrograma.

Es posible visualizar los hidrogramas parciales de cada subcuenca y el hidrograma final de la simulación. Estos se pueden ver junto al hidrograma observado para eventuales comparaciones. Para visualizar resultados específicos de un elemento es necesario seleccionarlo en *Basin map*. Es posible visualizar tres tipos de resultados para cada elemento: *Graph*, *Summary Table* y *Time-Series Table*. Los resultados requeridos se visualizan automáticamente en el área del *Desktop*. Si se selecciona más de un elemento, se visualiza un resultado por cada elemento. Mediante la visualización grafica es posible llevar a cabo un primer análisis del flujo estimado por parte de la simulación.

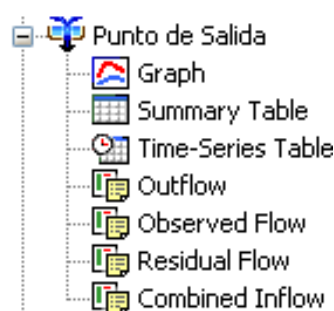


Figura II.7.- Detalle de cada visualización de cada elemento.

El elemento más interesante de la cuenca es el “*Punto de salida*”. De éste se conocen también los caudales medidos en la estación de aforo de Arazuri. Dada esa circunstancia, la cual permite hacer una comparación real entre los simulado y lo observado, este punto ha sido el de referencia en este estudio.

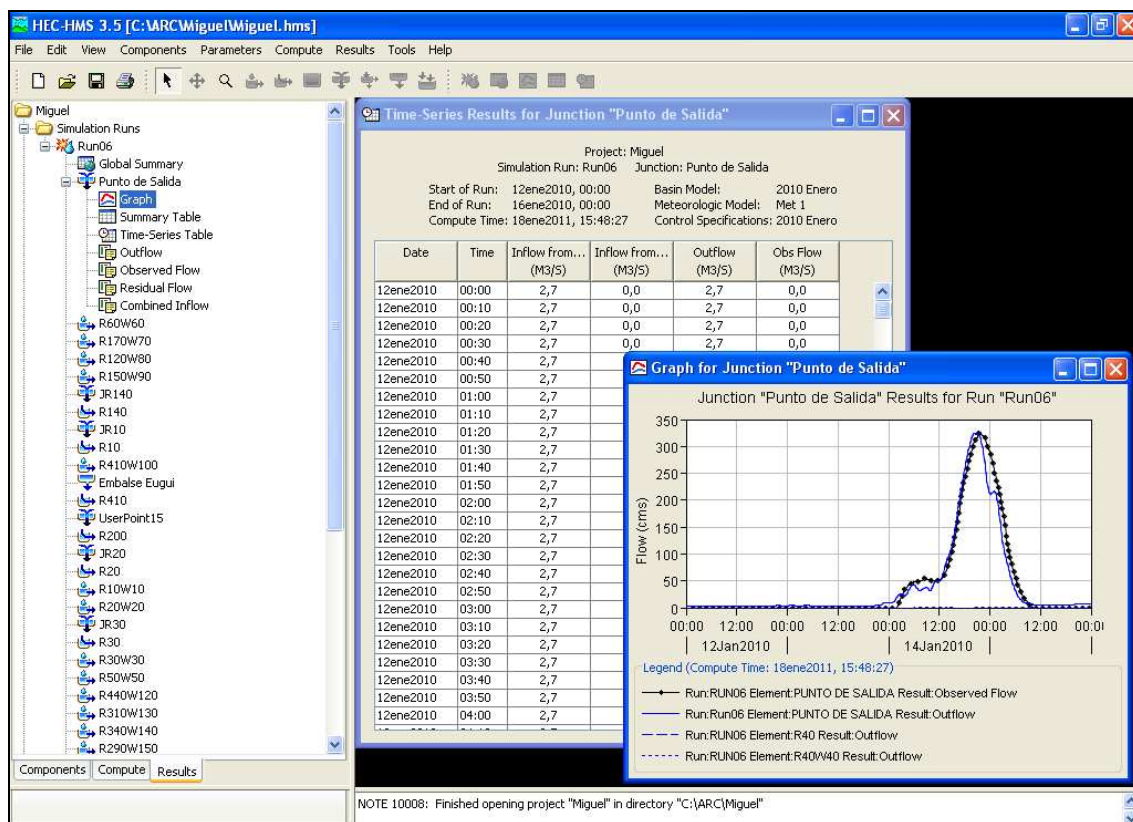


Figura II.8.- Detalle de visualización de los resultados del *Punto de Salida* -Arazuri.

ANEXO III

Separación del flujo base.

III.1. Introducción.

De cara al estudio de tormentas individuales es fundamental la separación del flujo base de la escorrentía directa, ya que es esta última la que realmente se originó por la tormenta. La escorrentía directa y el flujo base pueden separarse por varios métodos.

Los métodos generalmente más empleados son el *método de la línea recta*, el *método del flujo base fijo* y el *método de la pendiente variable* (Chow, 1994).

- El *método de la línea recta* consiste en dibujar una línea horizontal desde el punto en que comienza la escorrentía directa hasta que intersecta al segmento de recesión. Este método sólo es aplicable a corrientes efímeras.
- En el *método del flujo base fijo* se prolonga el flujo base inicial hacia adelante hasta el momento del pico de caudal. Se supone que la escorrentía superficial termina un tiempo N después del pico de caudal. Luego se usa una línea recta para unir la proyección del flujo base con el hidrograma en el tiempo N después del pico de caudal.
- En el *método de la pendiente variable*, al igual que en el del flujo base fijo, el flujo base se proyecta hacia adelante hasta el momento del pico de caudal. Y la curva de flujo base que se produce cuando cesa la escorrentía directa se proyecta hacia atrás hasta el momento del punto de inflexión del segmento de recesión, tras el pico de caudal. Luego se unen ambos segmentos extrapolados con una recta.

III.2. El Método de Eckhardt.

En la caracterización de este trabajo se utilizó como método de separación del flujo base, el algoritmo de Eckhardt, que es un método biparamétrico que introduce en el parámetro adicional una componente de aproximación hidrológica e hidrogeológica, dotando así a la ecuación de un mayor significado físico.

K. Eckhardt (2005) propuso un filtro de dos parámetros cuya expresión es:

$$q_i = \frac{(1 - BFI_{Max})}{1 - a BFI_{Max}} [Q_i - a(Q_{i-1} - q_{i-1})] ; \quad q_i \geq 0 \quad (III.1)$$

En donde:

- q_i → Escorrentía directa en el instante i .
- Q_i → Escorrentía total en el instante i .
- a → Constante de recesión del flujo subterráneo.
- BFI_{Max} → Índice del flujo subterráneo.

Hay autores que recomiendan la aplicación de estos filtros realizando más de una pasada (Eckhardt, 2008). Para obtener la escorrentía directa en este trabajo se aplicó el filtro desarrollado por Eckhardt realizando dos pasadas. El objeto de realizar dos pasadas del filtro es eliminar tanto el flujo subterráneo más lento como el flujo subterráneo que se produce durante los eventos.

La expresión anterior generalizada se puede expresar como:

$$q_i^j = \frac{(1 - BFI_{Max}^j)}{1 - a^j BFI_{Max}^j} [q_i^{j-1} - a^j (q_{i-1}^{j-1} - q_{i-1}^j)] \quad ; \quad q_i^j \geq 0 \quad (III.2)$$

El primer parámetro, a , se relaciona con la recesión del flujo base mientras que el segundo parámetro, BFI_{Max} , indica la máxima proporción de flujo base, con respecto a la escorrentía total, que se alcanzaría en la condición de equilibrio, si el almacenamiento de la cuenca se mantuviese constante en un periodo de tiempo suficientemente largo.

Con la utilización de una plantilla diseñada para una hoja de cálculo *Excel* de *Microsoft Office*, realizada por Mikel Goñi Garatea, del Departamento de Hidrología del área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural de la Universidad Pública de Navarra, se han realizado los cálculos. El algoritmo supone la introducción de los datos diezminutales o quinceminutales, según la estación de aforo, de caudal medido. Una tabla ayuda en la elección de los valores de filtros y parámetros de los mismos, y una grafica caracteriza el nivel de flujo base quitado con dichos valores de parámetros.

En este caso se utilizaron algunas tareas comunes:

- Se ha intentado quitar el flujo base para que fuese lo más parecido posible al simulado, probando diferentes valores de los parámetros del filtro.
- Para los dos eventos se han puesto los mismos valores de parámetros del filtro, para quitar el flujo base de la misma manera.

Tabla III.1.- Algoritmo de separación del flujo base (Evento 2006 para Arazuri).

Filtro	1
a	0,998
BFI _{MAX}	0,6
Inicio (min)	2460
Final Q (min)	4620
Final P (min)	
Caudal mínimo (m³/s)	0,5
Inicio HED(min)	2480
Final HED(min)	4610

El parámetro a se determinó con un valor de 0,999 o próximo a él, y el parámetro BFI_{Max} igual a 0,6 o próximo a él, variándose en función del grafismo del dato del caudal y para que el resultado sea lógico.

Los datos, en minutos, de inicio y fin del evento se eligieron de tal manera que los eventos de avenida fuesen totalmente comprendidos. El limite temporal de los datos de las avenidas es fundamental para que sean perfectamente superpuestos con los de la simulación.

La gráfica que visualiza el comportamiento del algoritmo al variar los parámetros introducidos, corta el caudal de avenida sólo entre el intervalo de tiempo indicado en la tabla.

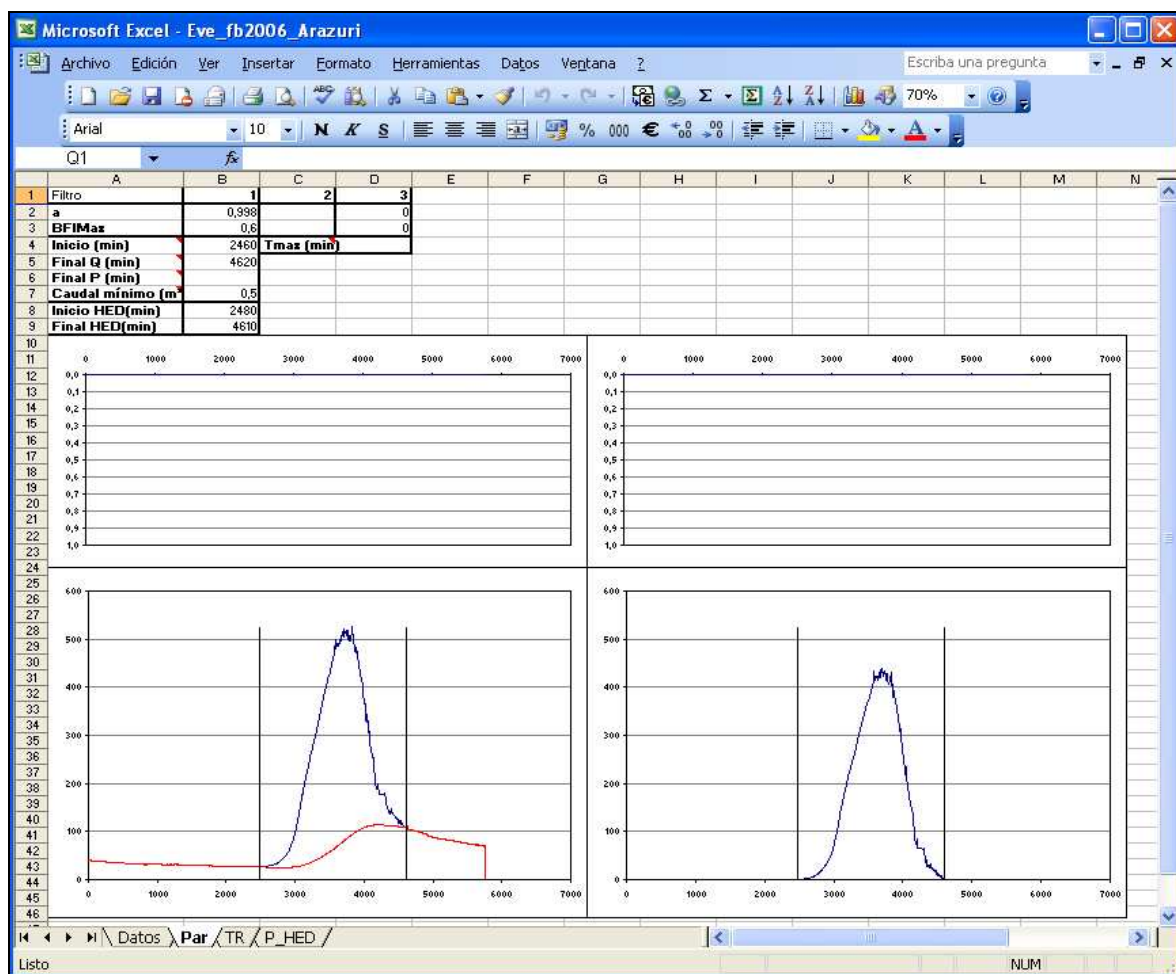


Figura III.1.- Captura de pantalla del modelo creado por Goñi Garatea en una hoja de cálculo de *Excel* del algoritmo de separación del flujo base (Evento 2006 para Arazuri).

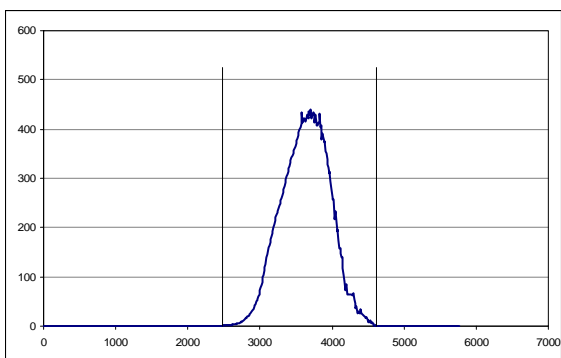
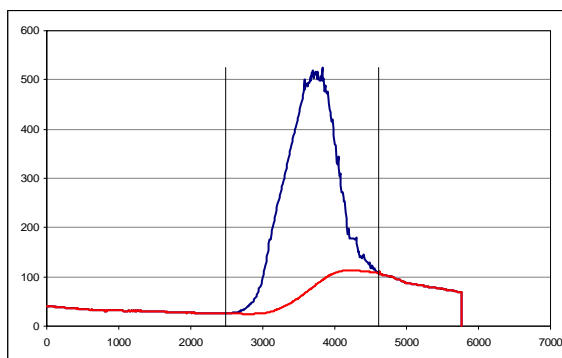
Una vez separado el flujo base, los valores diezminutales de escorrentía directa, se han cargados en el modelo creado en HEC-HMS. La escorrentía directa, así obtenida, sirve como conjunto de datos necesarios por la comparación con el caudal simulado por el modelo.

III.3. Los flujos bases de cada evento.

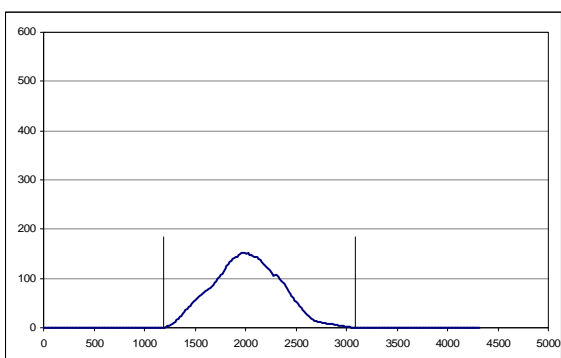
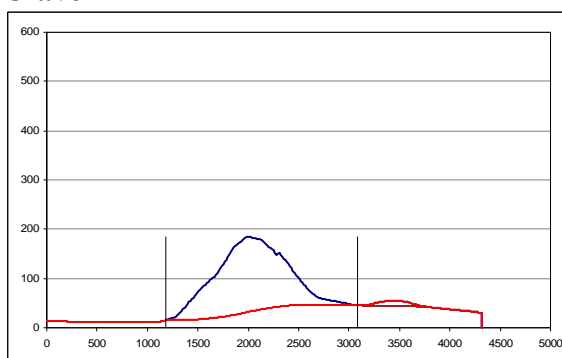
A continuación se exponen de forma más precisa cada uno de los gráficos de flujo base correspondiente a cada evento.

Evento de Marzo de 2006

Arazuri

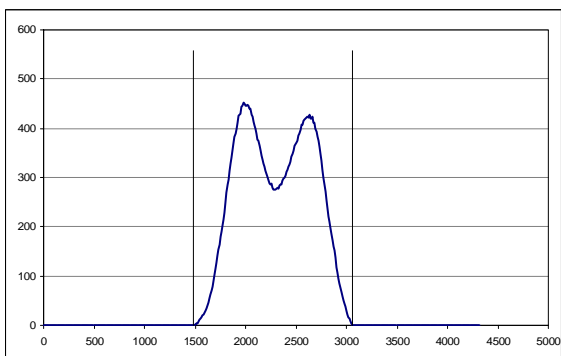
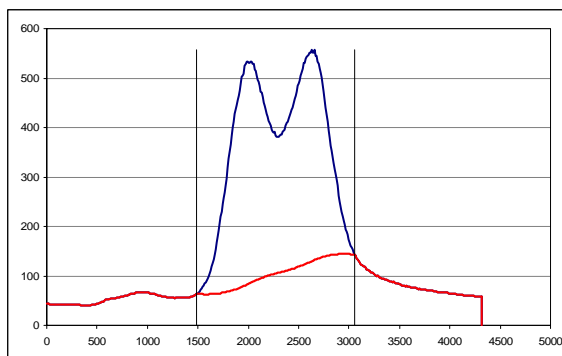


Olave

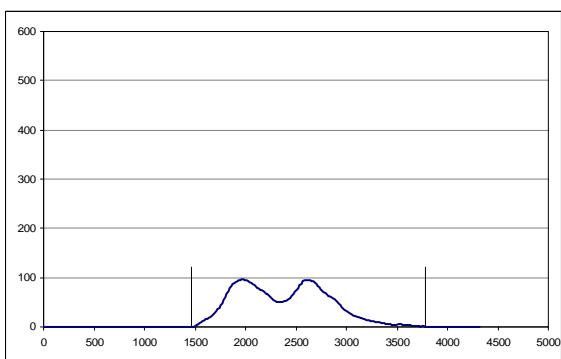
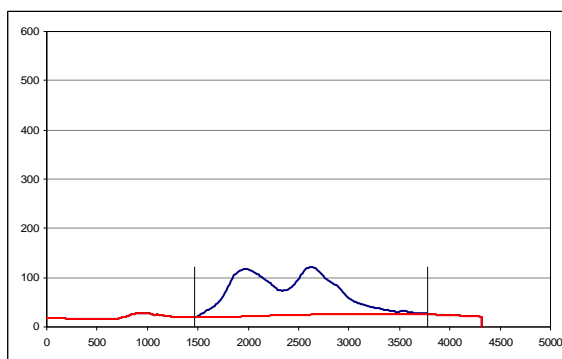


Evento de Abril de 2007

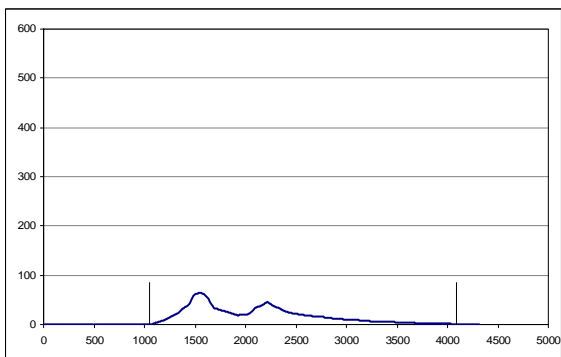
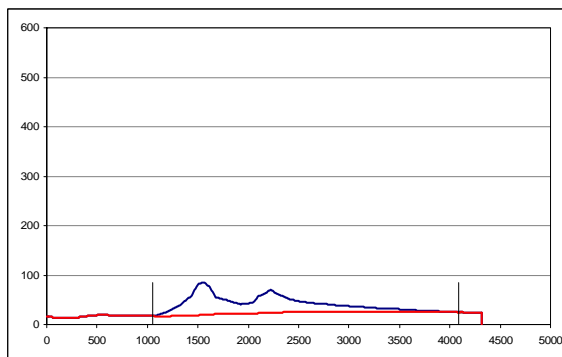
Arazuri



Olave

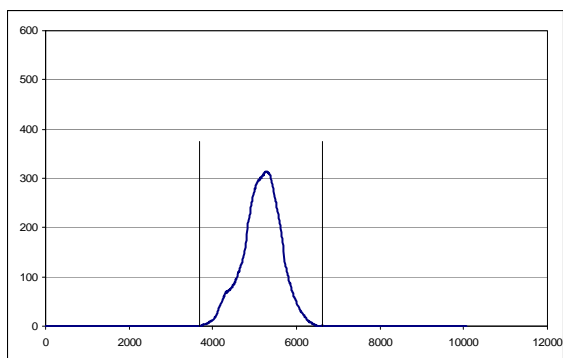
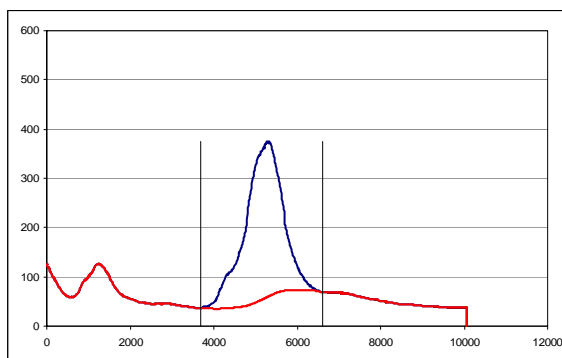


Huarte

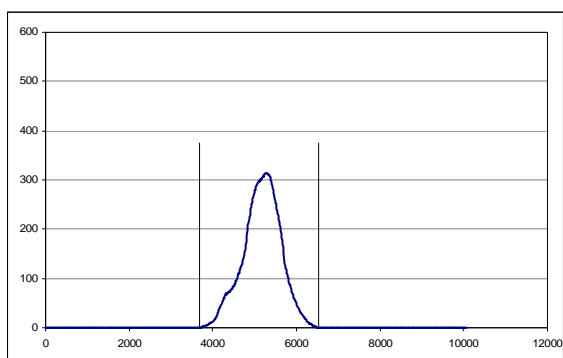
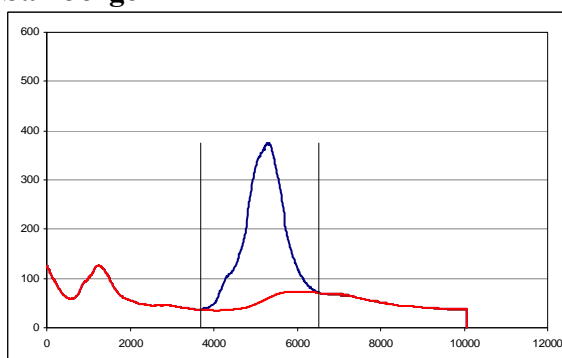


Evento de Enero de 2009

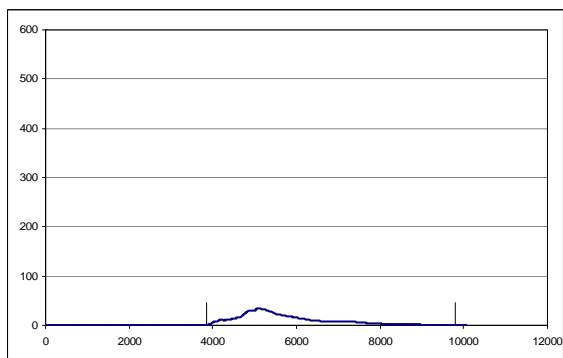
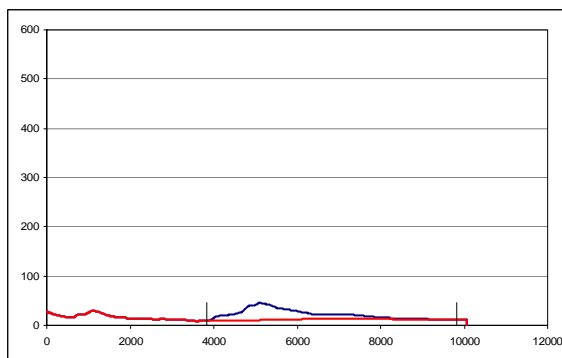
Arazuri



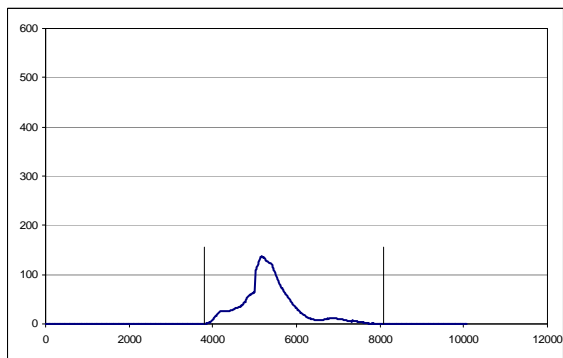
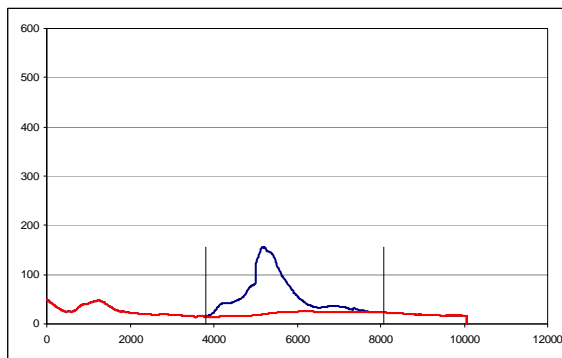
San Jorge



Huarte

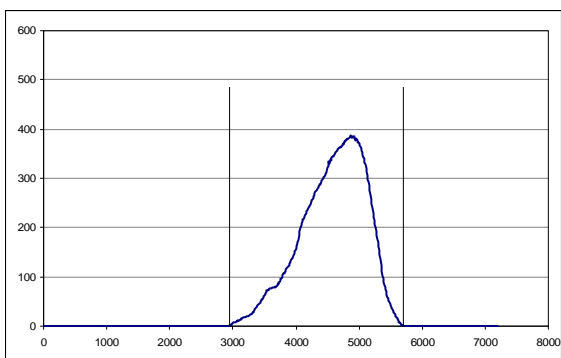
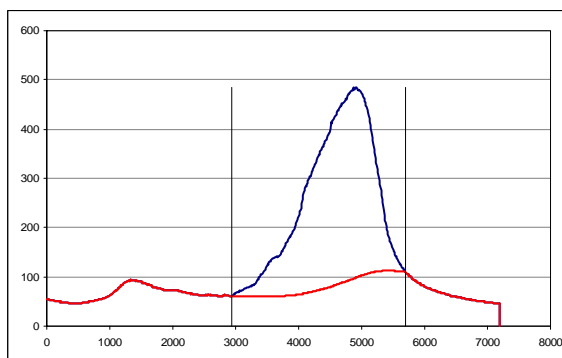


Olave

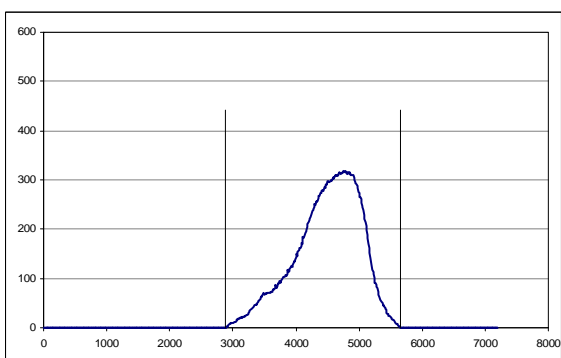
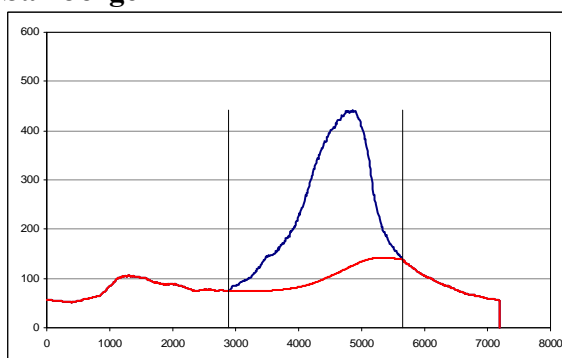


Evento de Febrero de 2009

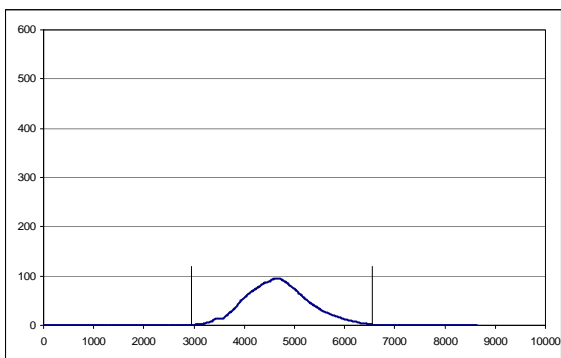
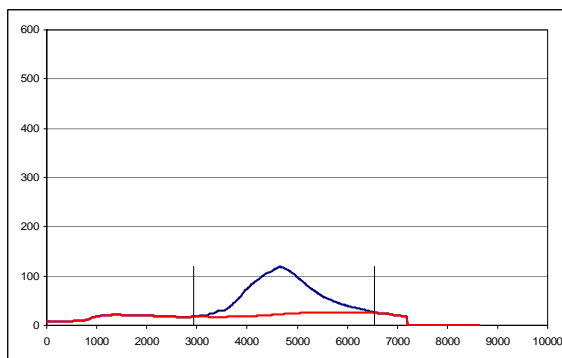
Arazuri



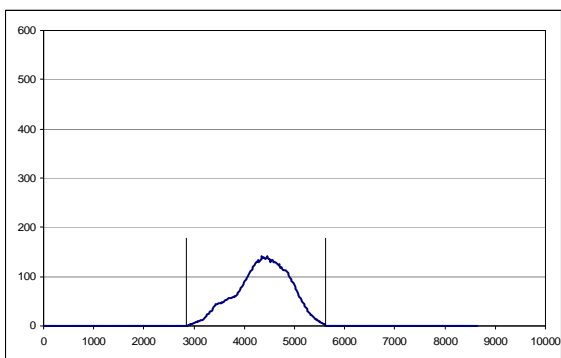
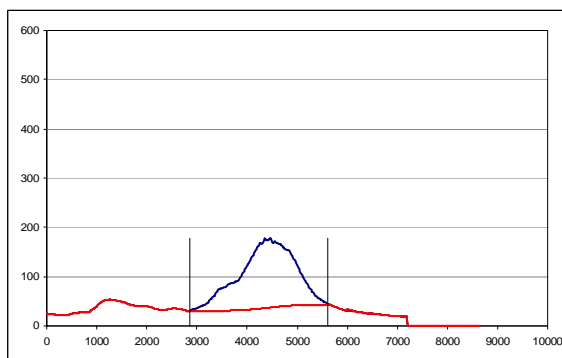
San Jorge



Huarte

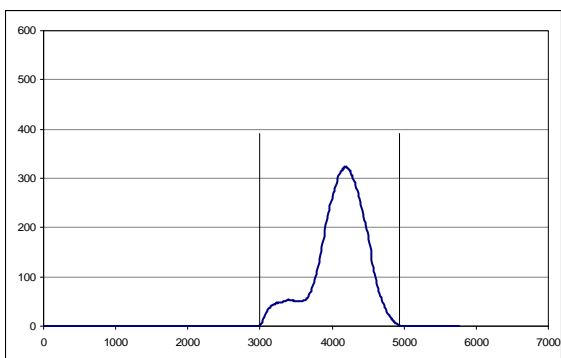
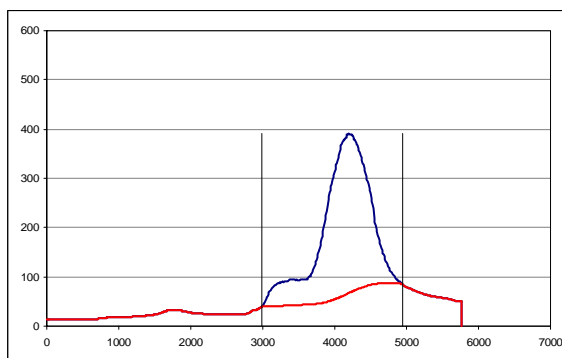


Olave

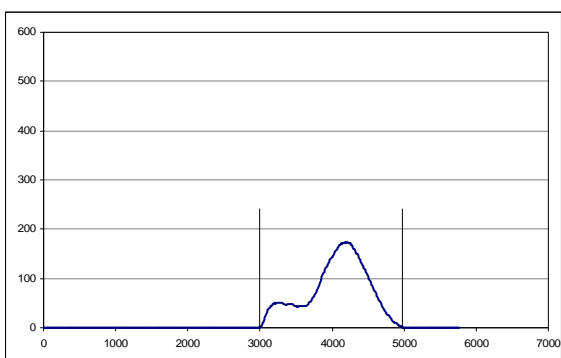
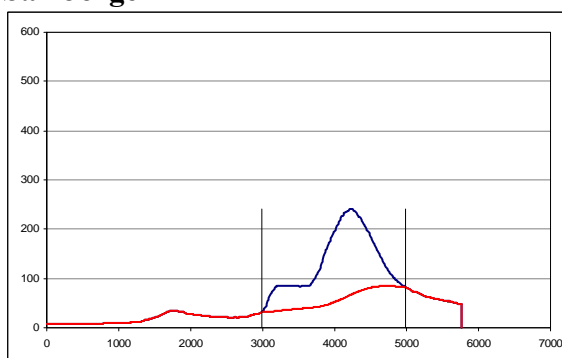


Evento de Enero de 2010

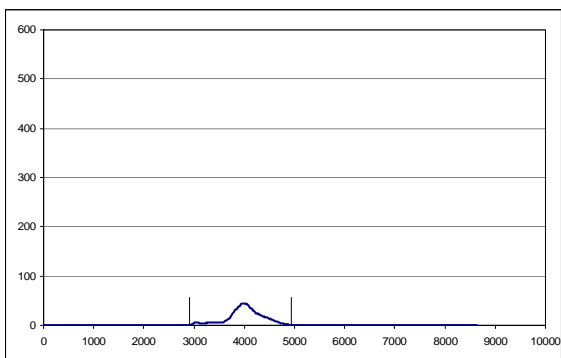
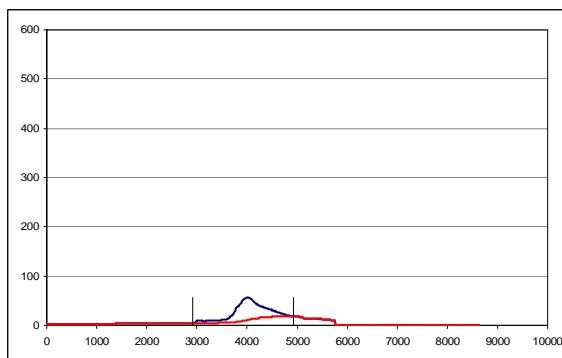
Arazuri



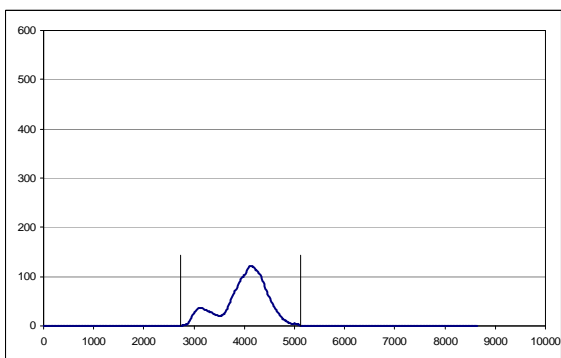
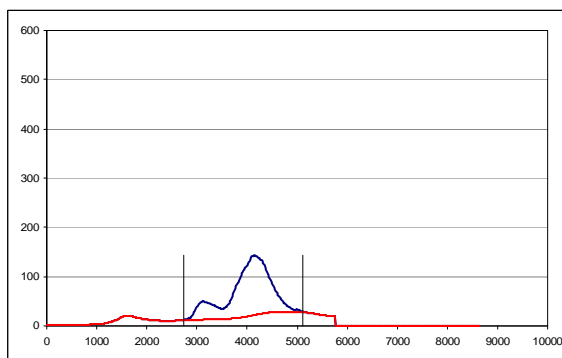
San Jorge



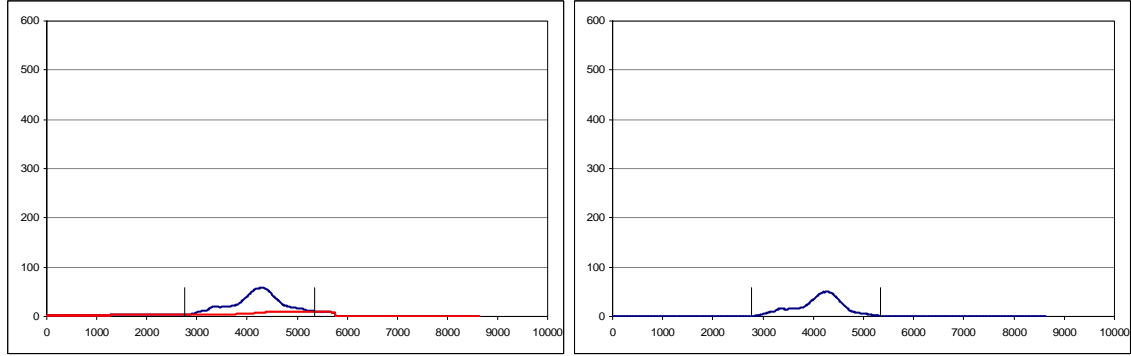
Huarte



Olave



Echavacoiz



ANEXO IV

Análisis de la distribución espacial de las precipitaciones.

IV.1. Elección de los parámetros para la representación gráfica.

Antes de realizar el análisis de la distribución espacial de las precipitaciones, se ha recurrido al programa informático *ArcView* (ESRI).

Partiendo de los datos de la precipitación registrada en cada estación meteorológica, hay que tener en cuenta tres parámetros, y cuya determinación han servido para caracterizar dichas lluvias.

Estos parámetros son los siguientes:

- *Output Grid Cell Size:*

Este parámetro sirve para determinar el tamaño de la cuadrícula y el dato a introducir se mide en las unidades en las que esté predeterminado la capa seleccionada con la que se quiere trabajar.

Se han realizado varias pruebas para un día de un evento (10/3/2006) para un mapa que comprende las cuencas y subcuencas de los río Arga (Hasta Pamplona), Ulzama y Elorz, variando este valor y dejando los otros dos por los valores que vienen por defecto (Parámetro 2 como “12” y tercer parámetro como “2”) y se puede llegar a la conclusión de que el valor de “20” es el más adecuado para este trabajo.

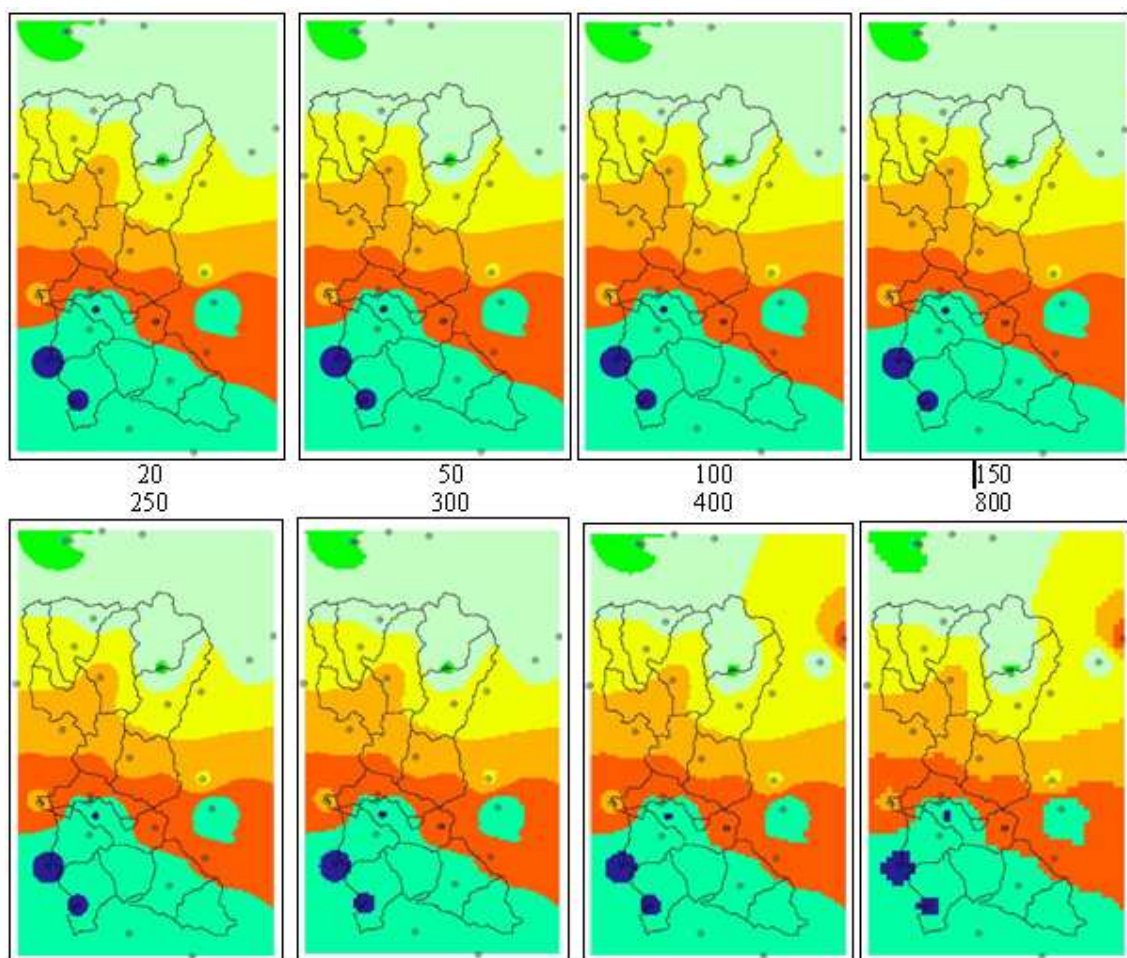


Figura IV.1.- Figuras de determinación del parámetro 1.

El reducir el número, es tal la resolución pedida que el programa llega incluso a bloquearse al realizar el proceso. El aumentar el número hace que la resolución de las imágenes sea de peor calidad y precisión.

Lógicamente, si el mapa seleccionado tiene unas dimensiones mayores, se deberá de aumentar el número, y viceversa, con la finalidad de adaptarlo a esa nueva situación. Por ejemplo, para un mapa entero de Navarra, se seleccionará el valor de “50” para este primer parámetro dado que es el más adecuado del mismo modo que se ha valorado el valor de “20” para el mapa de las subcuencas.

En la Figura N° 1 de este Anexo se muestran las diferentes pruebas realizadas para este parámetro.

- *N° of neighbors:*

Este parámetro sirve para determinar el número de puntos que hay entre cada estación meteorológica para realizar la relación entre ellas. Por defecto, este valor aparece como 12.

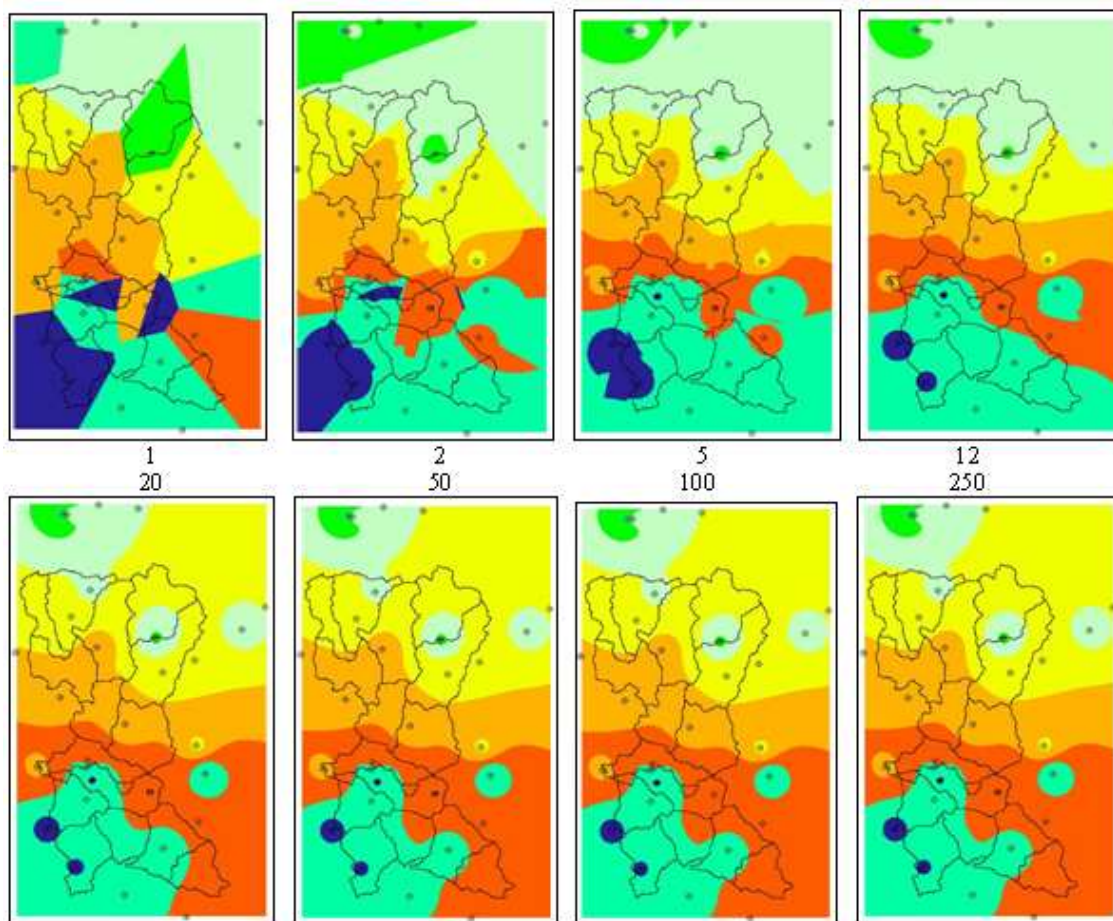


Figura IV.2.- Figuras de determinación del parámetro 2.

Se han realizado también varias pruebas para el mismo día del evento (10/3/2006), variando este valor. Se ha dejado el valor del parámetro anterior como 20, y el valor del tercer parámetro el que viene por defecto, que es de “2”. En este caso, se puede llegar a la conclusión de que el valor de “20” es el más adecuado para este trabajo.

El reducir el número, resulta similar a como si se realizase unos polígonos de Thiessen, por lo que los mapas son muy desfigurados y poco representativos. Al aumentar el número las diferencias con respecto al número elegido son casi inapreciables.

En la Figura N° 2 de este Anexo se muestran las diferentes pruebas realizadas para este parámetro.

- *Power*:

Este parámetro sirve para determinar la influencia que tiene cada estación meteorológica en relación entre ellas. Por defecto, este valor aparece como 2.

Se han realizado también varias pruebas para el mismo día del evento (10/3/2006), variando este valor. Se han dejado los valores de los parámetros anteriores como “20” tal y como se han optado según las decisiones citadas. Finalmente y para este caso, se puede llegar a la conclusión de que el valor de “2”, venido por defecto es el más adecuado para este trabajo.

En la Figura N° 3 de este Anexo se muestran las diferentes pruebas realizadas para este parámetro.

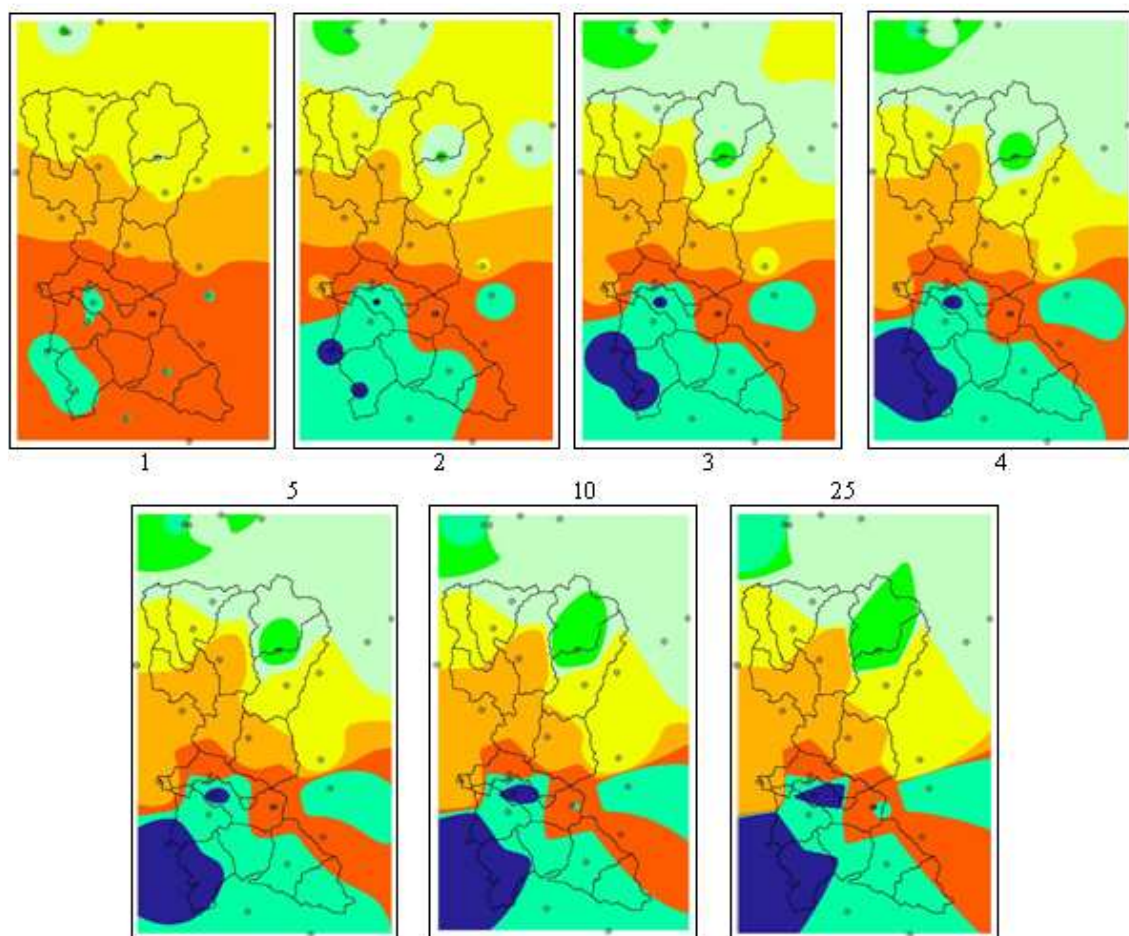


Figura IV.3.- Figuras de determinación del parámetro 3.

La escala utilizada en las figuras anteriores ha sido la que se muestra a continuación, y muestra los valores desde 0 a 210 litros por metro cuadrado de lluvia caída.



Figura IV.4.- Escala utilizada en las figuras anteriores.

Una vez seleccionado los valores más adecuados para la realización de los mapas de lluvia, se puede observar la distribución de la lluvia caída para cada uno de los eventos caracterizados en el apartado IV.3 de este Anexo.

IV.2. Caracterización de algunos los eventos más significativos.

Previa a la muestra de las características de cada evento seleccionado para haber sido realizado con el modelo de simulación hidrológica HEC-HMS, se ha realizado una breve explicación de algunos de los eventos más significativos, incluidos como es lógico, los que han sido seleccionados.

Esta caracterización breve se ha realizados mediante el siguiente formato.

<h1><u>EVENTO</u></h1>							
- CARACTERISTICAS:							
Se realiza una ficha con las siguientes características:							
* Se cita el periodo que abarca el evento en fecha; día/mes/año.							
* Se indica el tipo de precipitación (Lluvia, nieve y/o granizo), así como si existió la presencia de viento.							
* Se nombran aquellos ríos que se han visto afectados en mayor o menor medida, dentro de toda la cuenca del río Arga, tanto dentro como fuera de la zona de estudio.							
* Se realiza un pequeño comentario acerca del evento, en donde puede aparecer una pequeña descripción del mismo, así como de las actuaciones llevadas a cabo por los servicios de emergencia y/o Administración y/o de algunos daños ocasionados.							
* Se indica en donde se han causado los daños: En la agricultura, en edificios y/o en las infraestructuras.							
Fecha de evento		<i>Del día X al día Y del mes Z.</i>				Año	<i>año</i>
Lluvia	<i>Sí/No</i>	Nieve	<i>Sí/No</i>	Viento	<i>Sí/No</i>	Granizo	<i>Sí/No</i>
Ríos afectados		<i>Nombres de los ríos afectados.</i>					
Comentarios							
<i>- Descripción del temporal y/o actuaciones y/o descripción de algunos daños.</i>							
DAÑOS							
Agrícolas	<i>Sí/No</i>	Edificios	<i>Sí/No</i>	Infraestructuras	<i>Sí/No</i>		

Tabla IV.1.- Tabla modelo.

EVENTOS

Fecha de evento		Del 12 al 14 de enero.				Año	2010
Lluvia	Sí	Nieve	No	Viento	Sí	Granizo	No
Ríos afectados		Arga, Ulzama, Araquil					
Comentarios							
<div>- El temporal de lluvia viene precedido de una bajada de las temperaturas y caída de nieve en días anteriores. Las lluvias caídas provocan a su vez el derretimiento de esas nieves anteriores. El día 14 se cita en la prensa como el más lluvioso del invierno.</div> <div>- Cortes de carreteras secundarias por inundaciones y cortes de zonas de riesgo (Club Natación, Corrales del Gas, caminos de Burlada y de la Magdalena, Trinitarios...)</div> <div>- Se activa el protocolo de actuación del Ayuntamiento de Pamplona y se mantiene la Alerta Amarilla por parte del Gobierno de Navarra en toda la comunidad, minimizándose cualquier tipo de daño.</div> <div>- Se producen numerosos accidentes de tráfico por el fenómeno de 'lluvia engelante'.</div> <div>- Sin recogida de basuras en algunas localidades de la cuenca de Pamplona.</div> <div>- Según la prensa, Pamplona obtuvo el pico sobre las 22 horas, llegando a 240 m³/s.</div>							
DAÑOS							
Agrícolas	No	Edificios			No	Infraestructuras	No

Tabla IV.2.- Evento de enero de 2010, realizado en HEC-HMS.

Fecha de evento		Del 9 al 12 de febrero.				Año	2009
Lluvia	Sí	Nieve	No	Viento	No	Granizo	No
Ríos afectados		Arga, Ulzama, Larraun					
Comentarios							
<div>- Cortes de carreteras secundarias por inundaciones y desbordamientos en los barrios del norte de Pamplona y varios pueblos de la cuenca como Burlada, Huarte o Villava.</div> <div>- Cortes de zonas de manera preventiva: Carretera del Club Natación, el Camino Viejo de Burlada, la calle Magdalena, la Vuelta de Aranzadi, el acceso a Landaben por debajo de la vía, el puente de Curtidores la calle rio Arga, así como varias calles cercanas</div> <div>- Modificaciones en el transporte urbano comarcal.</div>							
DAÑOS							
Agrícolas	Sí	Edificios			Sí	Infraestructuras	Sí

Tabla IV.3.- Evento de febrero de 2009, realizado en HEC-HMS.

Fecha de evento		<i>Del 24 al 28 de enero.</i>				Año	<i>2009</i>
Lluvia	<i>Sí</i>	Nieve	<i>Sí</i>	Viento	<i>Sí</i>	Granizo	<i>Sí</i>
Ríos afectados		<i>Arga, Ulzama, Larraun, Araquil, Urbi, Elorz, Sadar, Altzania, Burunda</i>					
Comentarios							
<div><div>- Temporal de lluvia y nieve, con granizo en algunas zonas de la comunidad y con mucho viento (Entre 90- 120 Km./h – Máx. 193 Km./h en Gorramendi)</div><div>- Cortes de algunas carreteras o lugares en la zona de estudio: Huertas en Aranzadi, Landaben, la Magdalena...</div><div>- Uso de cadenas o cortes de carreteras secundarias e incluso cortes en carreteras principales en el resto de la comunidad.</div><div>- Daños en infraestructuras y edificios como cortes de luz, desprendimientos, árboles y postes de luz, telefonía... caídos, etc...y numerosos accidentes de tráfico.</div><div>- Cortes de zonas de manera preventiva (Burlada, Villava y Pamplona) y se decreta el nivel 3 [Alerta Naranja] en la comunidad y nivel de riesgo 4 por aludes en el Pirineo. Se roza el nivel 4 [Alerta Roja] en la zona pirenaica.</div><div>- Cancelaciones en el aeropuerto de Pamplona-Noáin.</div></div>							
DAÑOS							
Agrícolas	<i>Sí</i>	Edificios			<i>Sí</i>	Infraestructuras	<i>Sí</i>

Tabla IV.4.- Evento de enero de 2009, realizado en HEC-HMS.

Fecha de evento		<i>Del 27de marzo al 4 de abril.</i>				Año	<i>2007</i>
Lluvia	<i>Sí</i>	Nieve	<i>No</i>	Viento	<i>No</i>	Granizo	<i>No</i>
Ríos afectados		<i>Arga, Elorz, Ulzama, Araquil, Sadar, Burunda</i>					
Comentarios							
<div>- El temporal de lluvia viene precedido de caída de nieve en días anteriores. Las lluvias caídas provocan a su vez el derretimiento de esas nieves anteriores.</div> <div>- Cortes de carreteras secundarias por inundaciones en Pamplona.</div> <div>- Cortes y desvíos ferroviarios y desvío de algún vuelo.</div>							
DAÑOS							
Agrícolas	<i>Sí</i>	Edificios			<i>Sí</i>	Infraestructuras	<i>Sí</i>

Tabla IV.5.- Evento de marzo-abril de 2007, realizado parcialmente en HEC-HMS.

Fecha de evento		Del 9 al 12 de marzo.				Año	2006
Lluvia	Sí	Nieve	No	Viento	Sí	Granizo	No
Ríos afectados		Arga, Ulzama, Araquil, Larraun					
Comentarios							
<div>- Temporal de 5 días de lluvia, con viento, y precedido de nevadas en la zona norte de la comunidad.</div> <div>- Cortes de carreteras secundarias y diversas zonas por inundaciones, siendo Burlada el pueblo más afectado entre los numerosos pueblos de Navarra.</div>							
DAÑOS							
Agrícolas	Sí	Edificios			Sí	Infraestructuras	Sí

Tabla IV.6.- Evento de marzo de 2006, realizado en HEC-HMS.

Fecha de evento		<i>Del 28 de noviembre al 5 de diciembre.</i>				Año	<i>2002</i>
Lluvia	<i>Sí</i>	Nieve	<i>Sí</i>	Viento	<i>No</i>	Granizo	<i>No</i>
Ríos afectados		<i>Arga, Ulzama, Araquil, Larraun, Elorz, Altzania, Burunda</i>					
Comentarios							
<div>- <i>Temporal de lluvia y nieve durante varios días.</i></div> <div>- <i>Diversas zonas inundadas en Pamplona (San Jorge, Rochapea, Landaben...), Huarte, Villava, Arre y otros pueblos de Navarra de otras zonas.</i></div>							
DAÑOS							
Agrícolas	<i>No</i>	Edificios			<i>Sí</i>	Infraestructuras	<i>No</i>

Tabla IV.7.- Evento de noviembre y diciembre de 2002.

Fecha de evento		Del 23 al 27 de diciembre.				Año	1993
Lluvia	Sí	Nieve	Sí	Viento	Sí	Granizo	No
Ríos afectados		Arga, Ulzama, Araquil, Larraun, Elorz, Sadar					
Comentarios							
<div>- Temporal de lluvias en donde los embalses tienen que soltar agua y su papel en al regulación es polémico. Son las inundaciones mayores que las de 1992 y más grandes desde enero de 1981.</div> <div>- Daños muy graves agrícolas e infraestructuras en los márgenes de los ríos Arga, Araquil y Ulzama.</div> <div>- Cortes de carreteras y se producen inundaciones en numerosísimos pueblos de Navarra.</div> <div>- Se plantean nuevos proyecto en algunas zonas para solucionar los daños o evitarlos en un futuro (Reponer las defensas del Arga en el sur, construir una nueva escollera en Pamplona, reformar el puente Plazaola o dragar el Arga en Pamplona)</div>							
DAÑOS							
Agrícolas	Sí	Edificios			Sí	Infraestructuras	Sí

Tabla IV.8.- Evento de diciembre de 1993.

Fecha de evento		Del 6 al 10 de diciembre.				Año	1992
Lluvia	Sí	Nieve	Sí	Viento	No	Granizo	No
Ríos afectados		Arga, Ulzama, Araquil, Larraun, Elorz, Sadar					
Comentarios							
<div>- Temporal de lluvia y nieve. Los embalses tienen que soltar agua. Son las inundaciones más grandes desde 1980.</div> <div>- Diversas zonas inundadas en Pamplona (Echavacoiz, Chantrea, San Pedro, Rochapea, Landaben...), Burlada, Villava, Huarte, Olaz y otros pueblos del sur de Navarra.</div>							
DAÑOS							
Agrícolas	Sí	Edificios			Sí	Infraestructuras	Sí

Tabla IV.9.- Evento de diciembre de 1992.

Fecha de evento		Del 14 al 20 de enero.				Año	1981
Lluvia	Sí	Nieve	Sí	Viento	No	Granizo	No
Ríos afectados		Arga, Araquil					
Comentarios							
<div>- Temporal de lluvia y nieve. Las lluvias caídas provocan el deshielo de las nieves acumuladas en los primeros días.</div> <div>- Diversas zonas inundadas en Pamplona (San Pedro, Rochapea...) y otros pueblos de Navarra.</div> <div>- Cortes de carreteras y otras numerosas afecciones, aunque se dice que el nivel de las aguas es menor que en 1980.</div>							
DAÑOS							
Agrícolas	Sí	Edificios			Sí	Infraestructuras	Sí

Tabla IV.10.- Evento de enero de 1981.

Fecha de evento		Del 14 al 22 de diciembre.				Año	1980
Lluvia	Sí	Nieve	No	Viento	No	Granizo	No
Ríos afectados		Arga, Ulzama, Araquil, Altzania					
Comentarios							
<div>- Temporal de abundante lluvia que provocan el deshielo de las nieves acumuladas.</div> <div>- El temporal provoca grandes inundaciones, mayores a las de 1977 y quizás las de 1959.</div> <div>- Diversas zonas inundadas en Pamplona (San Jorge, Orvina, Chantrea, San Pedro, Rochapea...), Burlada, Villava, Huarte, Noáin, Zizur, Ibero, Echauri y otros pueblos de Navarra, así como otros lugares (Balsa de Loza).</div> <div>- Cortes de carreteras y otras numerosas afecciones, como la estación de RENFE.</div>							
DAÑOS							
Agrícolas	Sí	Edificios			Sí	Infraestructuras	Sí

Tabla IV.11.- Evento de diciembre de 1980.

IV.3. Representación de los eventos seleccionados: Mapas de representación y yetogramas.

Avenida de marzo 2006.

La representación gráfica de la lluvia caída en esta avenida, así como el gráfico de cada una de las EMAs utilizadas en este estudio.

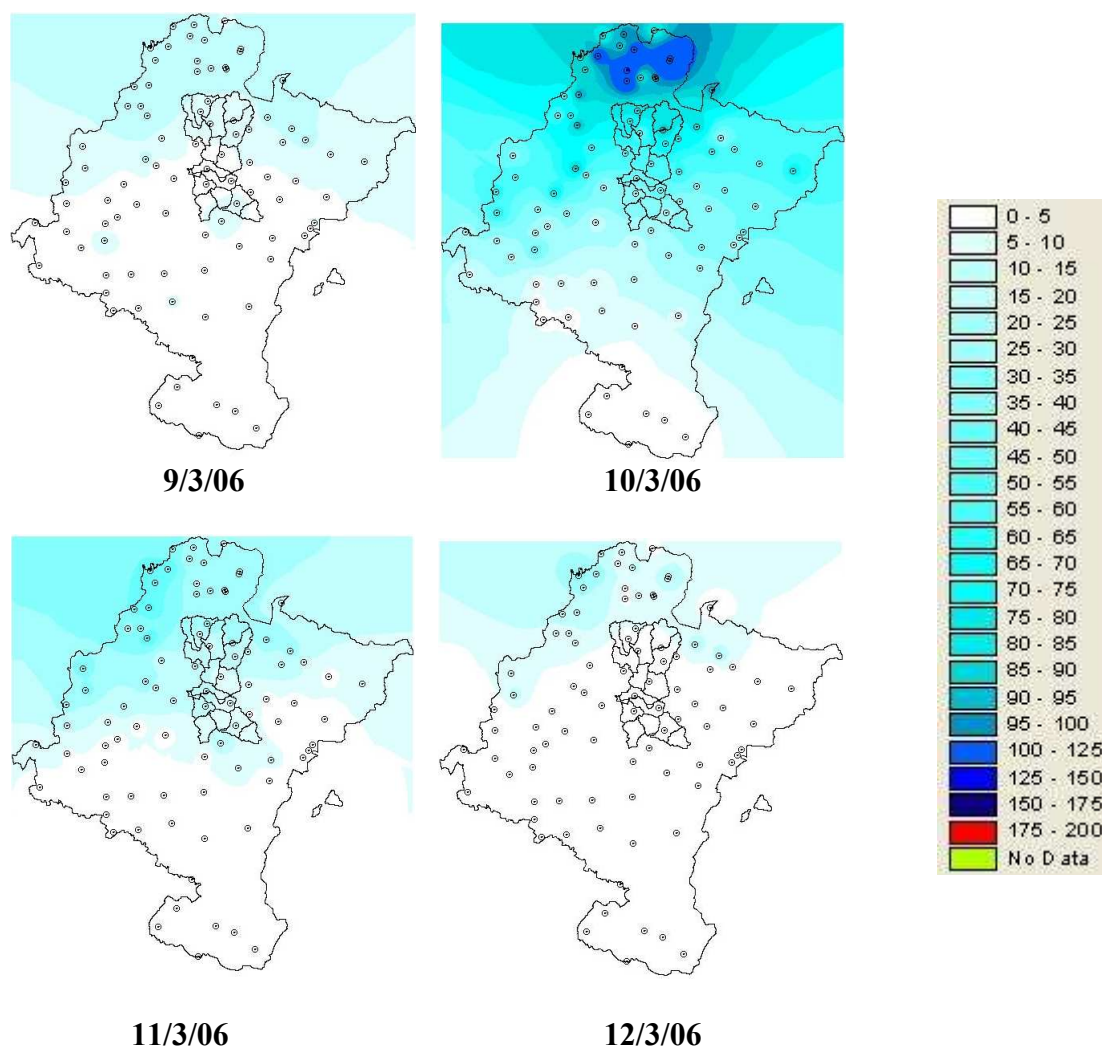


Figura IV.5.- Evolución de los mapas de precipitación diaria del evento de 2006.

Como se puede observar, las precipitaciones se dan principalmente en la parte norte y noroeste de la comunidad, siendo también esas zonas las más afectadas en la zona del estudio. Esta distribución de la lluvia, trajo como consecuencia que la parte de la cuenca con los aportes de caudal más elevados fuese la correspondiente al río Ulzama, cuya cuenca produjo un caudal de pico de casi 200 m³/s en Olave (Sobre un total poco más 500 m³/s en Arazuri). Por otro lado, casi no llovió en la zona sur de Pamplona, por lo que los aportes producidos por los ríos Elorz y Sadar fueron muy bajos.

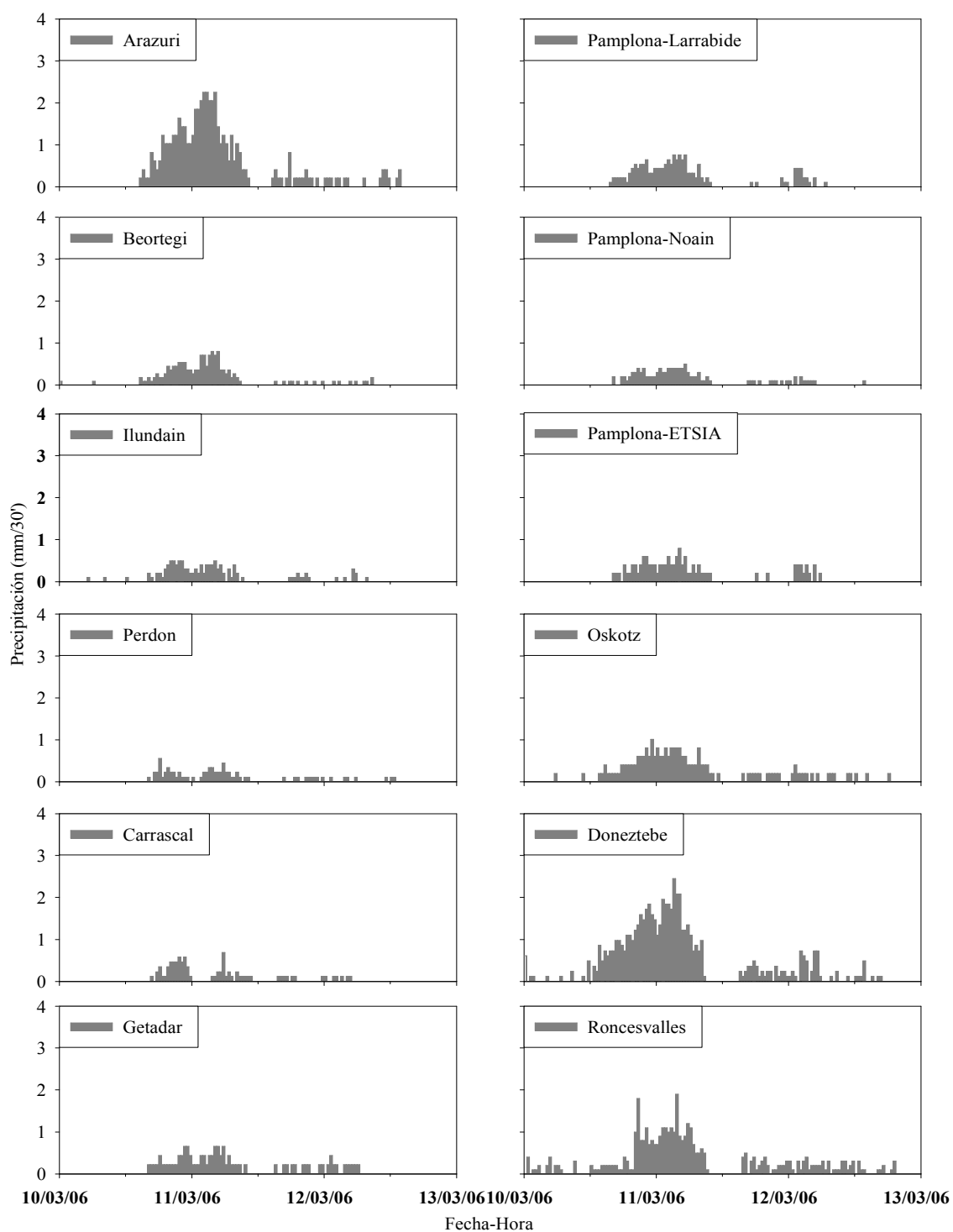


Figura IV.6.- Representación de los yetogramas del evento de 2006 en las distintas EMAs de la cuenca.

Avenida de abril 2007.

La representación gráfica de la lluvia caída en esta avenida, así como el gráfico de cada una de las EMAs utilizadas en este estudio.

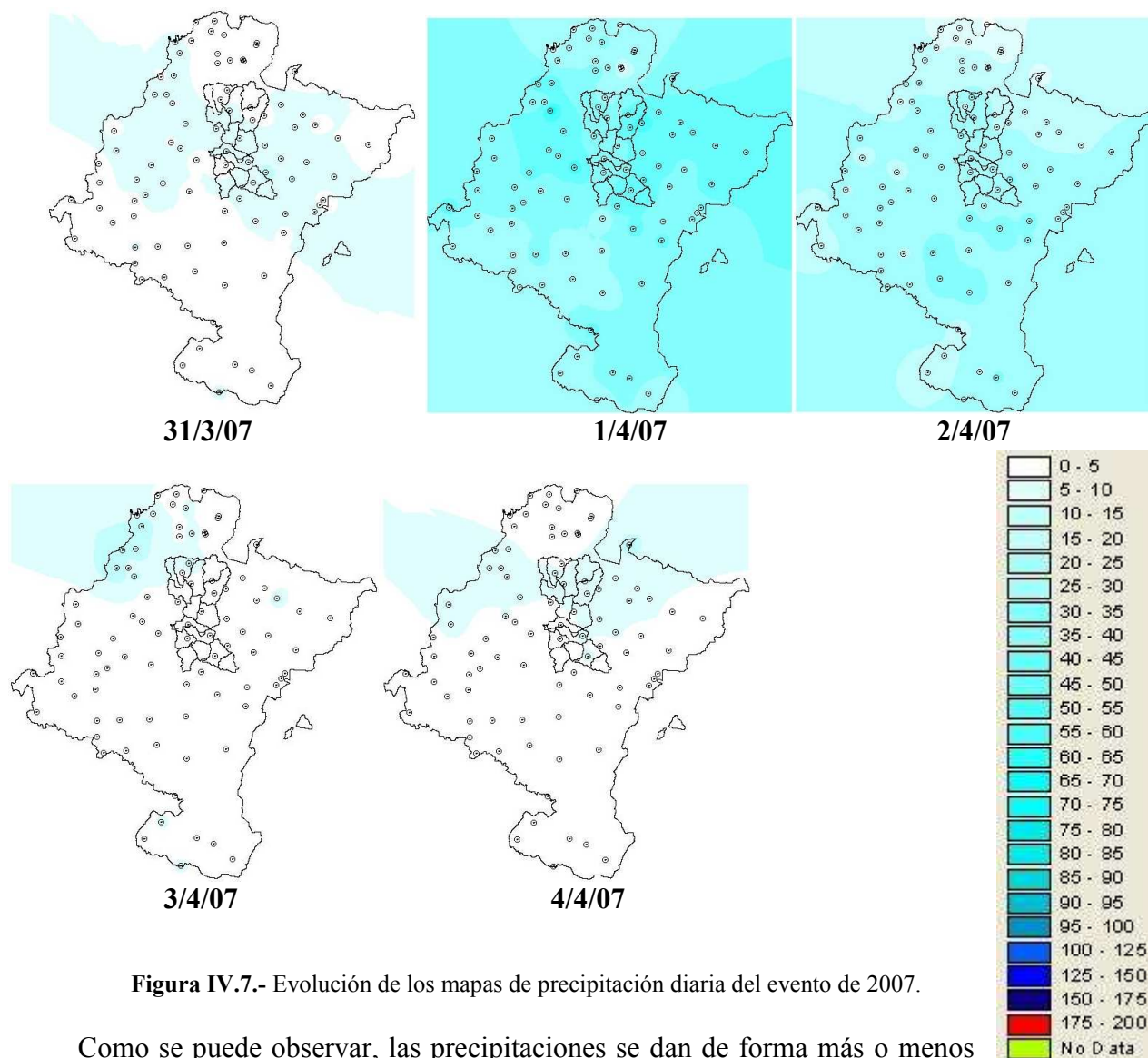


Figura IV.7.- Evolución de los mapas de precipitación diaria del evento de 2007.

Como se puede observar, las precipitaciones se dan de forma más o menos homogénea en toda la comunidad durante los primeros días del mes de abril.

Hay que tener en cuenta que estas lluvias vienen precedidas de un evento anterior en los últimos días de marzo de lluvia y nieve.

Esta distribución tan homogénea de la lluvia, y el derretimiento de la nieve acumulada del evento anterior, trajo como consecuencia una aportación más o menos proporcional en cada zona de la cuenca.

El aporte del río Ulzama fue de un caudal de pico de casi 120 m³/s en Olave sobre un total de más 500 m³/s en Arazuri.

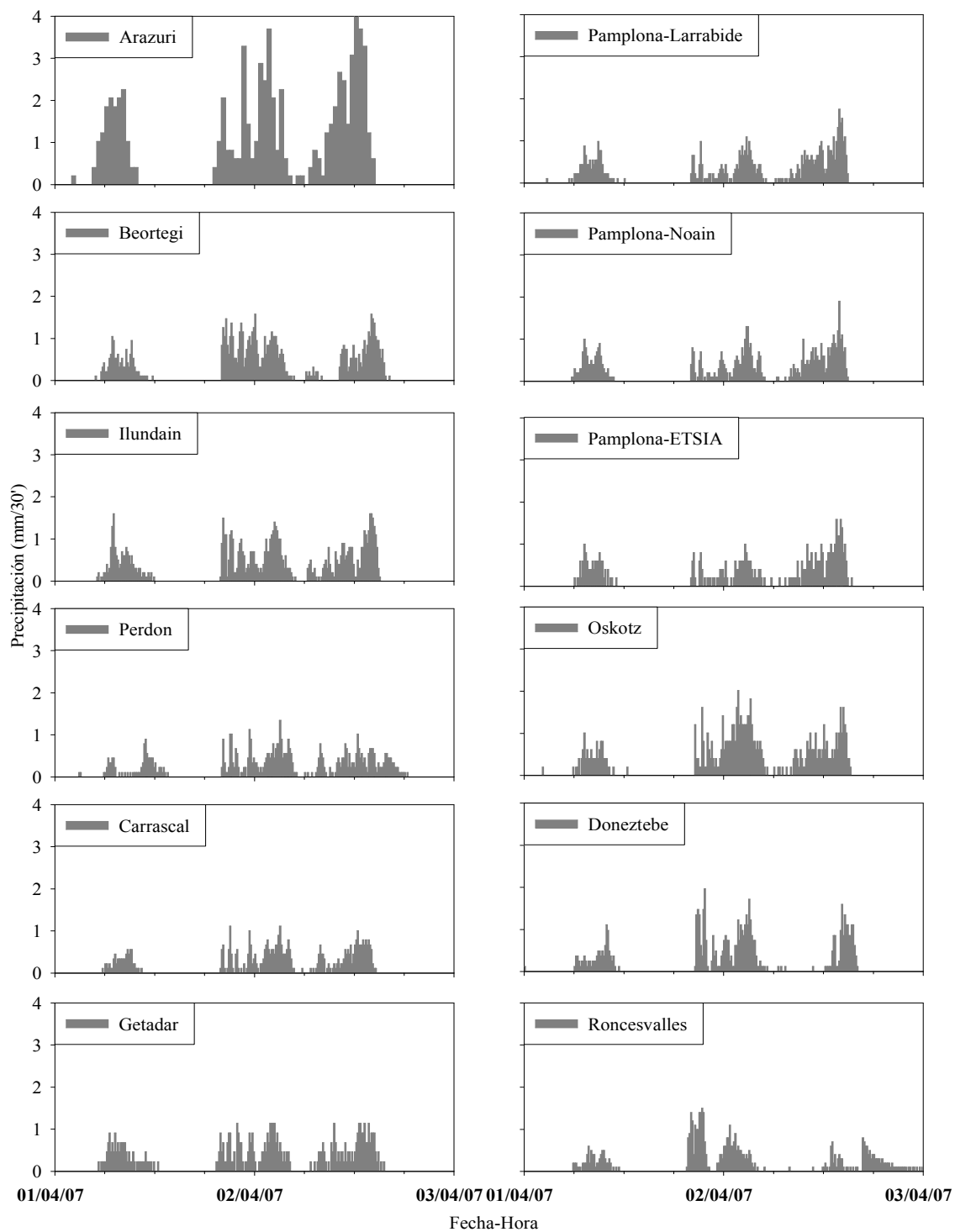


Figura IV.8.- Representación de los yetogramas del evento de 2007 en las distintas EMAs de la cuenca.

Avenida de enero 2009.

La representación gráfica de la lluvia caída en esta avenida, así como el gráfico de cada una de las EMAs utilizadas en este estudio.

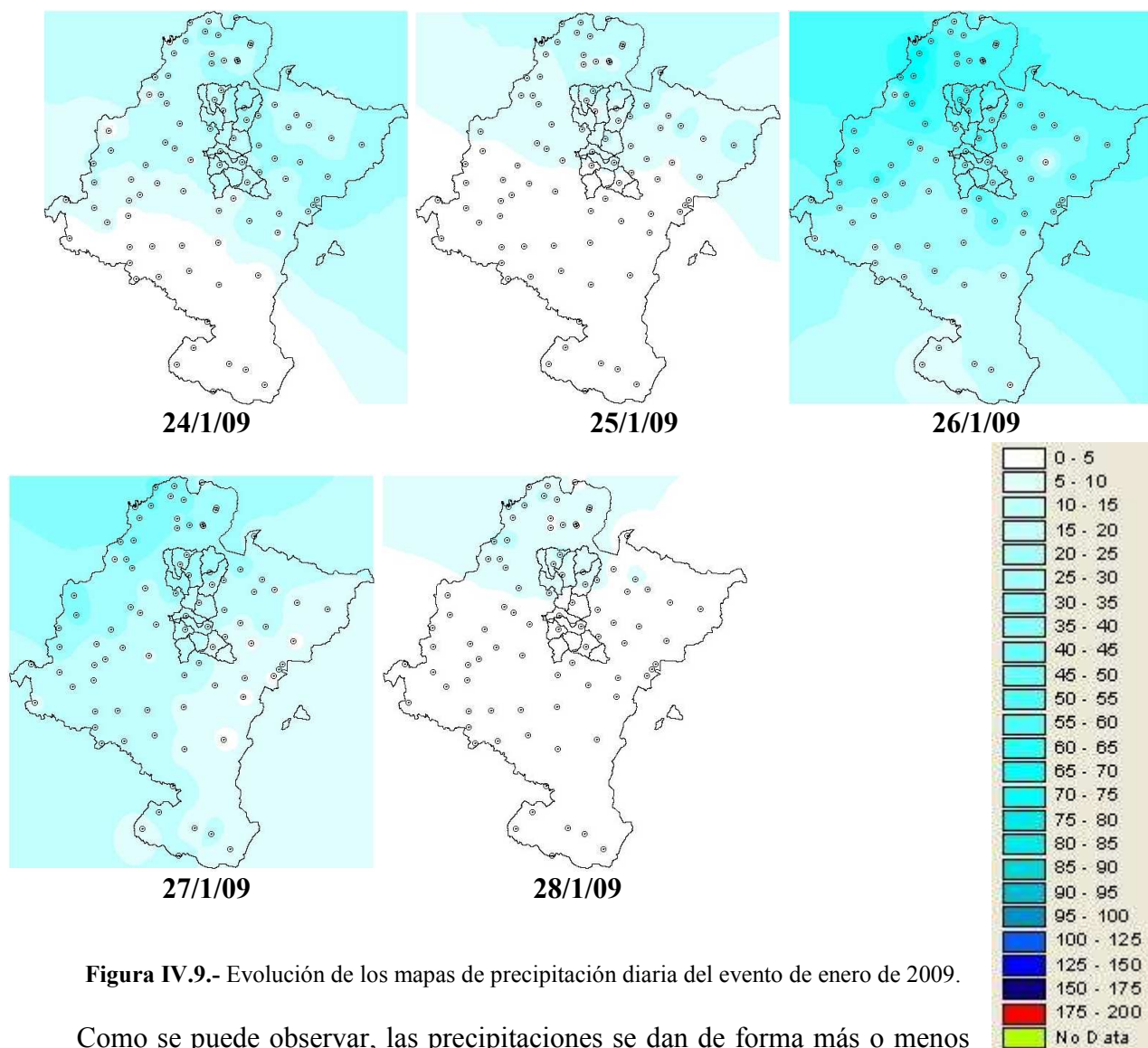


Figura IV.9.- Evolución de los mapas de precipitación diaria del evento de enero de 2009.

Como se puede observar, las precipitaciones se dan de forma más o menos homogénea aunque de mayor intensidad en las zonas norte y noroeste.

Es un evento de mezcla de lluvia y nieve que hace que las cantidades de precipitación registradas no sean muy elevadas, resultando engañosa la visualización del mismo.

La aportación de los ríos fue más o menos proporcional en cada zona de la cuenca en función de la visualización. De ahí que el río Ulzama tuviera un caudal pico de casi 160 m³/s en Olave, mientras que el río Elorz, que no tiene la serie completa, comience su serie de medición con un caudal de 60 m³/s en Echavacoiz, y el río Arga a la altura de Huarte, aportase solamente entre 40-50 m³/s.

El caudal pico fue de más de 350 m³/s en Arazuri.

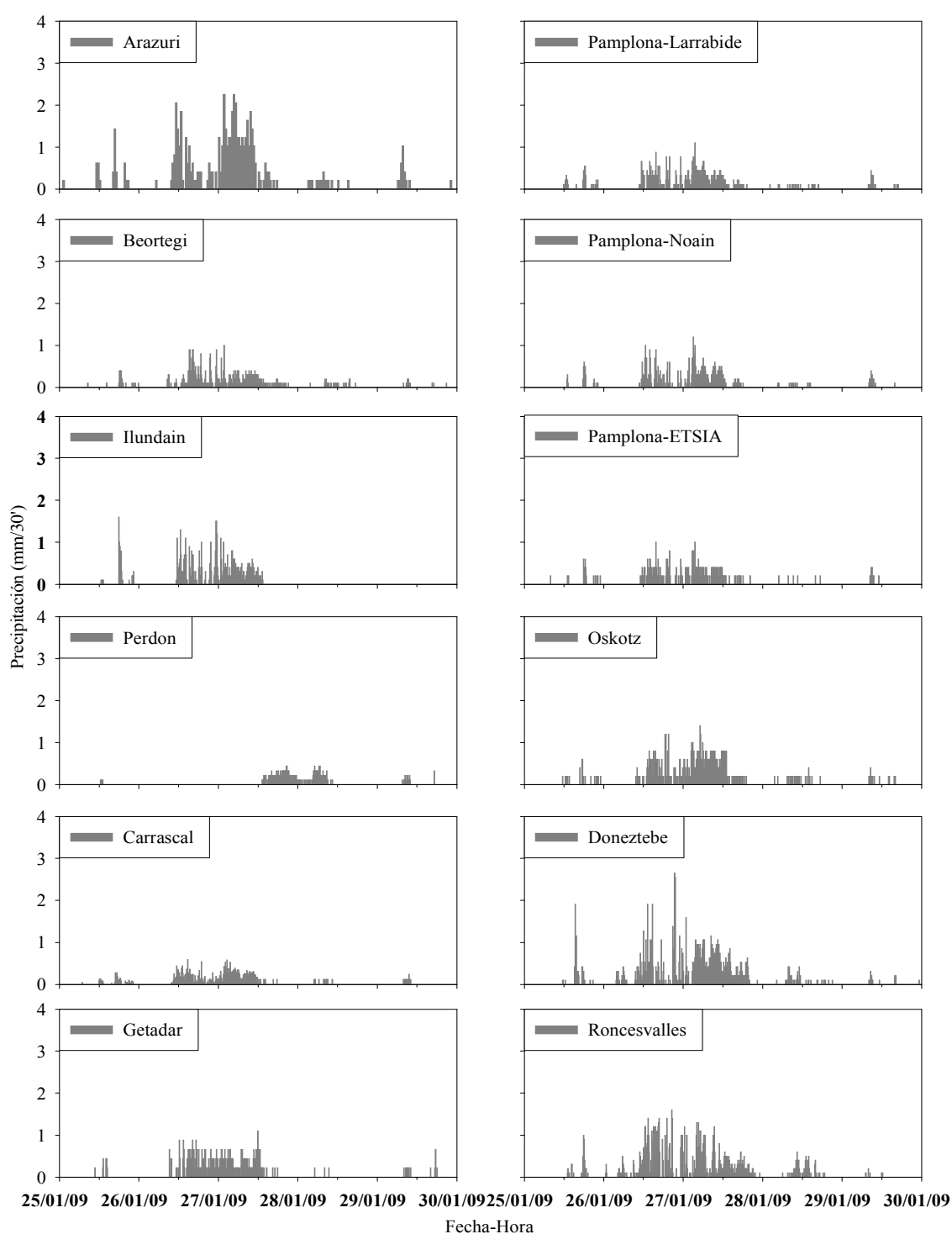


Figura IV.10.- Representación de los yetogramas del evento de enero de 2009 en las distintas EMAs de la cuenca.

Avenida de febrero 2009

La representación gráfica de la lluvia caída en esta avenida, así como el gráfico de cada una de las EMAs utilizadas en este estudio.

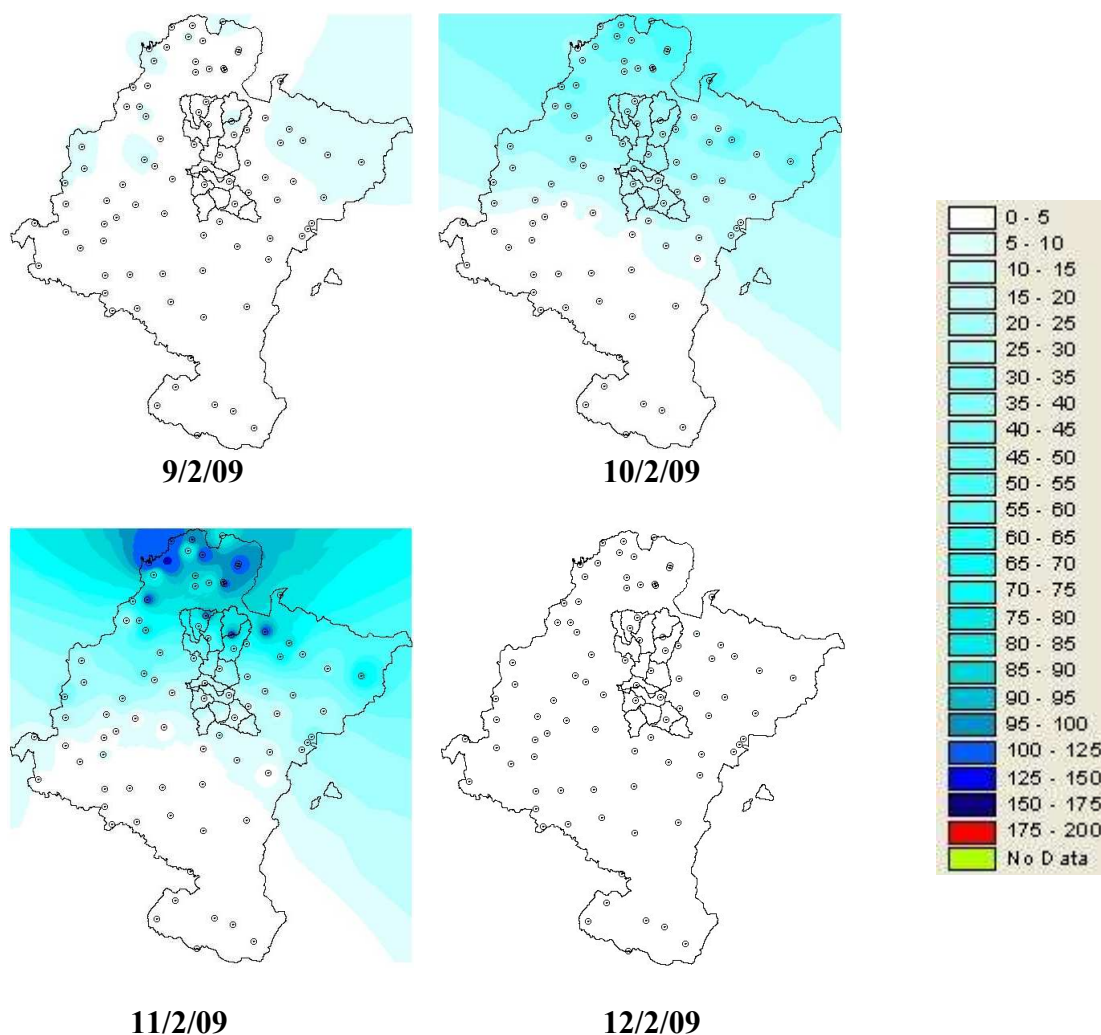


Figura IV.11.- Evolución de los mapas de precipitación diaria del evento de febrero de 2009.

Como se puede observar, las precipitaciones se dan de forma en la zona norte y de forma muy intensa en uno de los dos días en los que duran las lluvias. Es un evento viene precedido de la avenida del mes anterior (Enero 2009), por lo que las condiciones de humedad son ya de por sí grandes.

La aportación de los ríos fue más o menos proporcional en cada zona de la cuenca en función de la visualización. De ahí que el río Ulzama tuviera un caudal pico de casi 180 m³/s en Olave, mientras el río Arga a la altura de Huarte, aportaba casi 120 m³/s. El caudal pico fue de casi los 500 m³/s en Arazuri.

Es de destacar que el embalse de Eugui llega a registrar un caudal de desembalse de 162 m³/s, lo que significa que estaba desembalsando agua entorno a un 60% de su capacidad potencial, que es un valor muy alto para los datos registrados en este pantano.

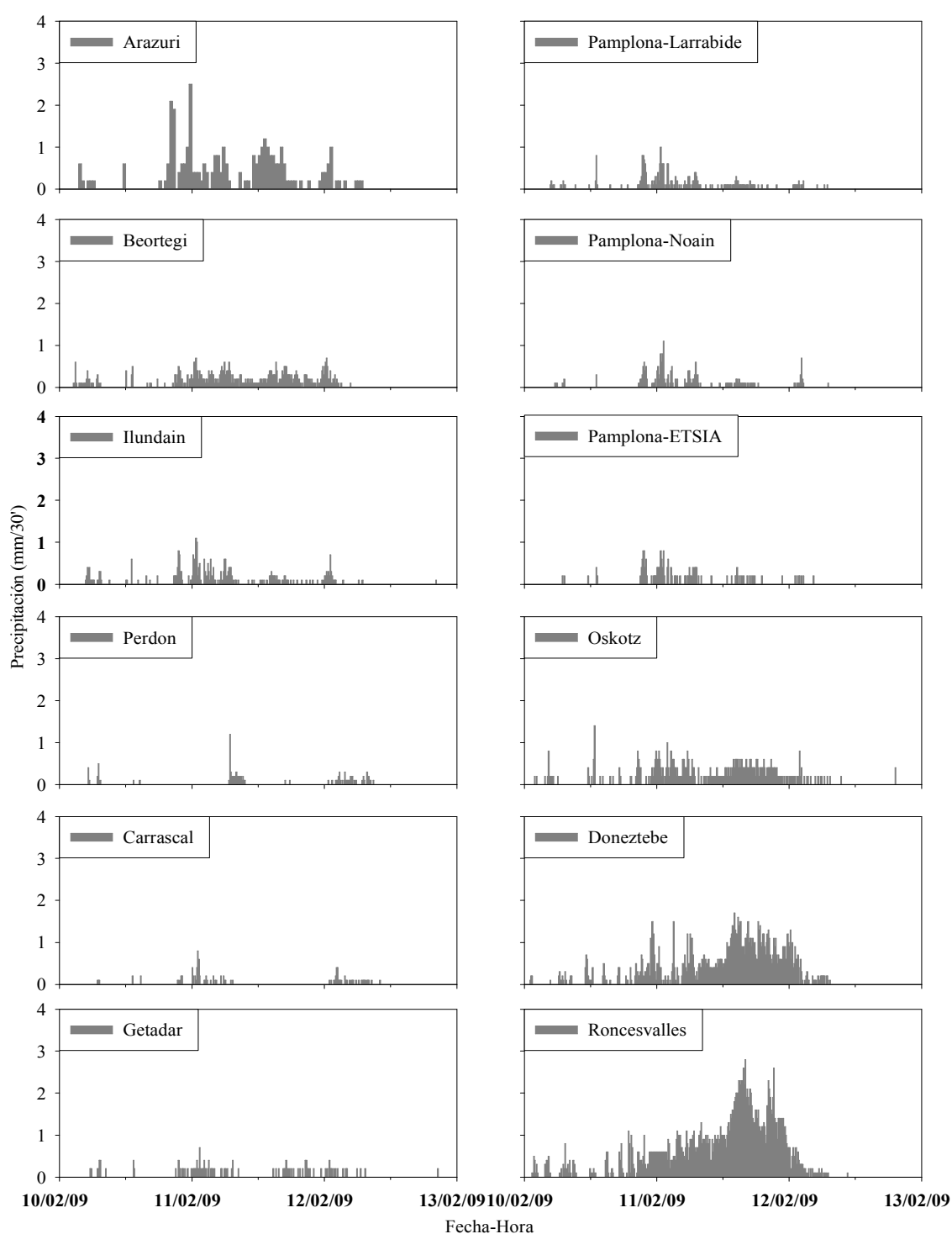


Figura IV.12.- Representación de los yetogramas del evento de febrero de 2009 en las distintas EMAs de la cuenca.

Avenida de enero 2010.

La representación gráfica de la lluvia caída en esta avenida, así como el gráfico de cada una de las EMAs utilizadas en este estudio.

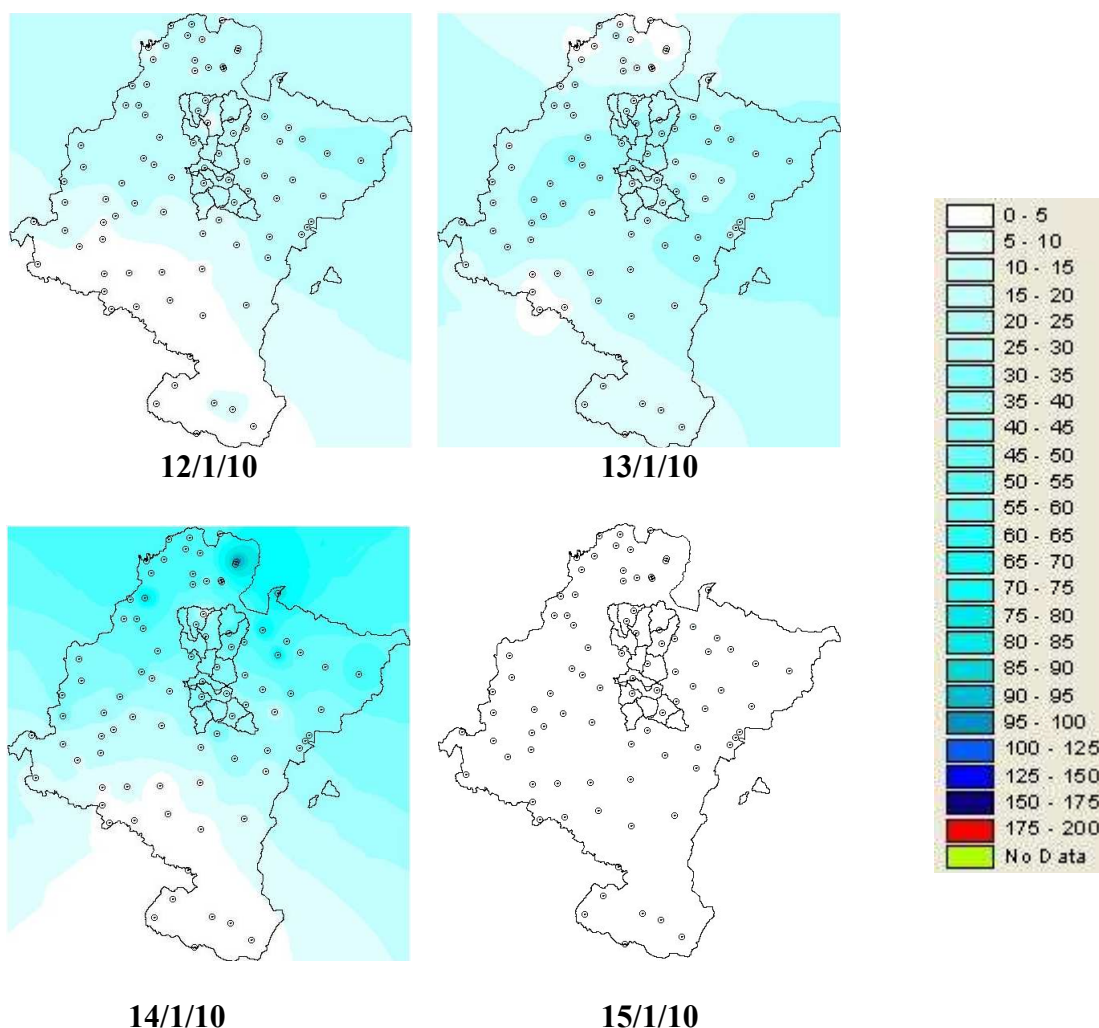


Figura IV.13.- Evolución de los mapas de precipitación diaria del evento de 2010.

Como se puede observar, las precipitaciones más intensas se dan principalmente el día 14 del mes, en donde se produjo un chaparrón. Aunque en general, es un evento de lluvia constante, salvo en alguna zona norte de la comunidad.

Dentro de la zona de estudio es la zona norte y centro de la misma en donde se produce la mayor incidencia.

La aportación del río Ulzama fue de un caudal pico de algo más de 140 m³/s en Olave, mientras el río Arga a la altura de Huarte y el río Elorz en Echavacoiz, tenían ambos un pico de casi 60 m³/s. Según la prensa, Pamplona obtuvo el pico sobre las 22 horas, llegando a 240 m³/s.

El caudal pico fue de casi los 400 m³/s en Arazuri.

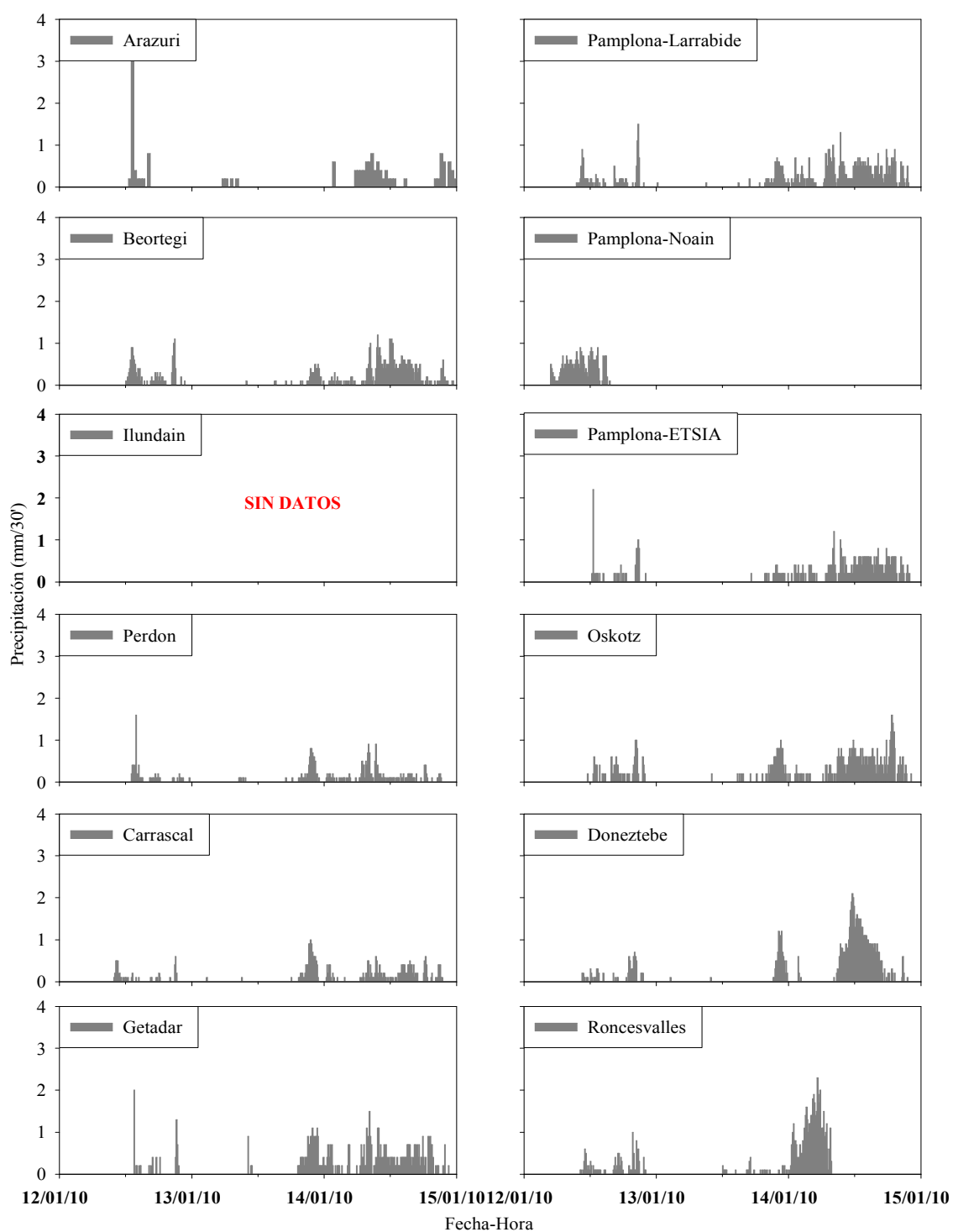


Figura IV.14.- Representación de los yetogramas del evento de 2010 en las distintas EMAs de la cuenca.

Tablas de la Condición de Humedad Antecedente (CHA).

La **Condición de Humedad Antecedente** (*Antecedent Moisture Condition* - AMC) se refiere a la capacidad del suelo de absorber la lluvia caída durante el evento, o bien su capacidad de producir escorrentía superficial y por lo tanto es un parámetro directamente relacionado con el número de curva o *CN*. En la CHA se establecen en el método tres niveles de humedad antecedente, dependiendo de la lluvia total caída en los 5 días que preceden a la lluvia en cuestión (Tabla IV.12). La condición de humedad antecedente seca (CHA I) es la que tiene un menor potencial de generación de escorrentía al estar el suelo en las condiciones más secas. La condición de humedad antecedente media (CHA II) tiene un potencial de generación de escorrentía medio y la condición de humedad antecedente húmeda (CHA III) es la que tiene una capacidad mayor de generación de escorrentía con la cuenca prácticamente saturada debido a las lluvias precedentes. La CHA puede estimarse a partir de las consideraciones mostradas en la Tabla IV.12 (Ponce, 1989) o mediante tablas similares de carácter regional.

Condición de Humedad Antecedente	Lluvia Total caída en los 5 días precedentes (mm)	
	Estación durmiente <i>(Octubre-marzo)</i>	Estación de crecimiento <i>(Abril-septiembre)</i>
I	Menor que 13	Menor que 26
II	De 13 a 28	De 36 a 53
III	Mayor que 28	Mayor que 53

Tabla IV.12.- Límites Estacionales de Lluvia para tres niveles de CHA.

CHA II	CHA I	CHA III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Tabla IV.13.- Valores de *CN* equivalentes para las tres CHA.

En la Tabla IV.13 se presentan los valores de *CN* equivalentes a las tres condiciones de humedad antecedente (*CHA*). Estos valores también se pueden relacionar entre sí mediante las expresiones:

$$CN(I) = \frac{CN(II)}{2,3 - 0,013 \cdot CN(II)} \quad (IV.1)$$

$$CN(III) = \frac{CN(II)}{0,43 + 0,0057 \cdot CN(II)} \quad (IV.2)$$

De forma que se pueden obtener los *CN* de las condiciones secas (I) y húmedas (III) en función de los valores de las medias (II), tal y como se ha realizado en este estudio.

En las tablas siguientes, se citan las *CHAs* de cada uno de los cinco eventos citados en este apartado para cada estación meteorológica.

EVENTO de 2006	05-mar	06-mar	07-mar	08-mar	09-mar	SUMA	CHA
EMA Arazuri	7,2	30,8	4,3	0,0	4,3	46,6	III
EMA Beortegi	8,2	11,0	5,5	0,0	1,1	25,8	II
EMA Doneztebe	21,6	23,0	12,4	1,0	9,9	67,9	III
EMA El Carrascal	10,6	17,6	1,7	0,0	3,9	33,8	III
EMA El Perdón	3,5	6,4	8,4	0,2	5,2	23,7	II
EMA ETSIA	8,2	20,7	2,8	0,0	2,0	33,7	III
EMA Getadar	6,6	12,8	0,9	0,2	3,8	24,3	II
EMA Ilundain	9,2	16,6	5,6	0,4	3,7	35,5	III
EMA Larrabide	9,4	24,0	4,5	0,4	3,6	41,9	III
EMA Noain	6,5	18,2	2,8	0,1	3,4	31	III
EMA Oskotz	15,8	36,4	8,5	1,2	5,3	67,2	III
EMA Ronvesvalles	11,5	21,0	30,1	6,2	14,0	82,8	III
EMM Belate	26,4	22,0	18,3	1,8	10,0	78,5	III
EMM Belzunce	26,0	15,5	6,2	0,0	3,4	51,1	III
EMM Erro	11,0	17,3	11,0	0,2	8,2	47,7	III
EMM Eugui	13,5	17,4	9,8	0,3	7,4	48,4	III
EMM Iraizotz	26,4	9,0	11,4	0,0	6,5	53,3	III
EMM Irotz	17,5	8,0	6,8	0,0	3,3	35,6	III
EMM Monreal	13,0	3,6	3,4	0,0	6,4	26,4	II
EMM Olague	17,5	5,0	10,0	0,0	7,0	39,5	III
EMM Zalba	26,3	7,0	7,9	0,0	5,0	46,2	III
EMM Zuazu	8,1	2,8	4,8	0,0	3,3	19	II
EMM Zubiri	12,4	30,0	8,0	0,0	6,0	56,4	III

Tabla IV.14.- Valores de *CHA* para el evento de 2006.

EVENTO de 2007	27-mar	28-mar	29-mar	30-mar	31-mar	SUMA	CHA
EMA Arazuri	36,8	5,5	0,4	8,2	2,9	53,8	III
EMA Beortegi	25,5	8,4	0,3	9,6	1,8	45,6	II
EMA Doneztebe	31,2	6,6	10,3	12,5	4,3	64,9	III
EMA El Carrascal	27,0	5,2	0,0	5,2	0,8	38,2	II
EMA El Perdón	26,2	4,4	0,2	8,2	2,9	41,9	II
EMA ETSIA	30,1	6,8	0,0	6,8	3,4	47,1	II
EMA Getadar	36,0	9,6	0,0	8,7	4,1	58,4	III
EMA Ilundain	26,9	8,0	0,3	7,5	4,0	46,7	II
EMA Larrabide	33,0	7,2	0,0	7,3	3,0	50,5	II
EMA Noain	27,9	6,1	Sin datos	Sin datos	Sin datos	34,0	I
EMA Oskotz	41,4	3,4	4,8	10,3	2,6	62,5	III
EMA Ronvesvalles	21,4	8,4	16,0	10,1	5,0	60,9	III
EMM Belate	45,2	10,4	9,2	12,0	0,4	77,2	III
EMM Belzunce	55,0	2,4	2,2	11,5	6,5	77,6	III
EMM Erro	33,8	1,6	2,9	14,0	2,5	54,8	III
EMM Eugui	31,5	3,4	4,9	16,0	1,8	57,6	III
EMM Iraizotz	36,0	1,2	4,9	10,7	3,4	56,2	III
EMM Irotz	30,0	0,5	1,0	11,0	8,0	50,5	II
EMM Monreal	36,9	0,3	0,2	8,8	7,5	53,7	III
EMM Olague	39,5	1,0	1,5	14,0	8,5	64,5	III
EMM Zalba	32,8	0,3	0,5	11,8	6,3	51,7	II
EMM Zuazu	29,4	1,8	0,3	12,7	13,6	57,8	III
EMM Zubiri	34,8	1,5	2,8	14,3	5,1	58,5	III

Tabla IV.15.- Valores de *CHA* para el evento de 2007.

EVENTO de 2009	21-ene	22-ene	23-ene	24-ene	25-ene	SUMA	CHA
EMA Arazuri	0,4	13,0	18,7	15,2	4,9	52,2	III
EMA Beortegi	2,2	13,6	20,9	26,4	2,7	65,8	III
EMA Doneztebe	12,1	8,5	36,2	36,2	6,7	99,7	III
EMA El Carrascal	0,0	9,9	17,7	11,0	3,4	42	III
EMA El Perdón	0,1	4,5	11,0	5,7	0,4	21,7	II
EMA ETSIA	0,0	10,5	18,9	12,5	4,2	46,1	III
EMA Getadar	1,3	16,1	12,1	21,3	2,0	52,8	III
EMA Ilundain	0,6	10,4	24,0	24,0	6,8	65,8	III
EMA Larrabide	0,2	10,8	21,7	13,2	5,2	51,1	III
EMA Noain	0,1	9,7	18,9	12,5	3,9	45,1	III
EMA Oskotz	3,4	21,2	21,8	19,0	5,0	70,4	III
EMA Ronvesvalles	9,6	10,7	42,1	34,9	4,8	102,1	III
EMM Belate	10,4	18	34,3	20	26,2	108,9	III
EMM Belzunce	5,5	12,5	18,5	23	9,5	69	III
EMM Erro	15,3	19	34	25,3	10,8	104,4	III
EMM Eugui	14	22	35,1	23,1	9,7	103,9	III
EMM Iraizotz	15,5	11,5	29,3	19,1	5,3	80,7	III
EMM Irotz	18	6	32	15,5	11,5	83	III
EMM Monreal	9,5	4	18	11,8	4	47,3	III
EMM Olague	17	9	30,5	20	2,5	79	III
EMM Zalba	10,4	13,5	26	29,7	9,7	89,3	III
EMM Zuazu	7,5	9,3	24,7	22	4,6	68,1	III
EMM Zubiri	12,5	13,8	36,2	21,8	9,2	93,5	III

Tabla IV.16.- Valores de *CHA* para el evento de enero de 2009.

EVENTO de 2009	05-feb	06-feb	07-feb	08-feb	09-feb	SUMA	CHA
EMA Arazuri	0,2	17,5	24,5	10,7	0,6	53,5	III
EMA Beortegi	0,0	14,3	18,4	26,7	1,3	60,7	III
EMA Doneztebe	0,0	19,9	37,3	15,0	2,4	74,6	III
EMA El Carrascal	0,0	17,5	6,7	8,2	0,0	32,4	III
EMA El Perdón	0,0	4,7	9,6	8,1	0,2	22,6	II
EMA ETSIA	0,0	14,9	20,9	15,7	0,4	51,9	III
EMA Getadar	1,8	11,7	5,3	13,6	0,0	32,4	III
EMA Ilundain	0,0	18,2	27,8	17,7	0,0	63,7	III
EMA Larrabide	0,0	16,4	19,8	13,7	0,3	50,2	III
EMA Noain	0,0	16,8	22,5	10,4	0,0	49,7	III
EMA Oskotz	1,2	9,6	11,2	29,4	2,0	53,4	III
EMA Ronvesvalles	0,0	Sin datos	45,9	12,7	2,1	60,7	III
EMM Belate	45,2	10,4	9,2	12,0	0,4	77	III
EMM Belzunce	55,0	2,4	2,2	11,5	6,5	78,5	III
EMM Erro	33,8	1,6	2,9	14,0	2,5	112,5	III
EMM Eugui	31,5	3,4	4,9	16,0	1,8	89	III
EMM Iraizotz	36,0	1,2	4,9	10,7	3,4	75,3	III
EMM Irotz	30,0	0,5	1,0	11,0	8,0	67	III
EMM Monreal	36,9	0,3	0,2	8,8	7,5	47,7	III
EMM Olague	39,5	1,0	1,5	14,0	8,5	71	III
EMM Zalba	32,8	0,3	0,5	11,8	6,3	65,9	III
EMM Zuazu	29,4	1,8	0,3	12,7	13,6	42,8	III
EMM Zubiri	34,8	1,5	2,8	14,3	5,1	80	III

Tabla IV.17.- Valores de *CHA* para el evento de febrero de 2009.

EVENTO de 2010	09-ene	10-ene	11-ene	12-ene	13-ene	SUMA	CHA
EMA Arazuri	1,0	4,1	1,2	13,8	6,0	26,1	II
EMA Beortegi	0,0	3,5	0,0	14,2	5,7	23,4	II
EMA Doneztebe	5,3	14,2	0,1	8,7	9,4	37,7	III
EMA El Carrascal	0,0	0,4	0,0	5,6	10,1	16,1	II
EMA El Perdón	0,0	4,3	0,5	6,8	8,0	19,6	II
EMA ETSIA	0,6	3,4	1,0	9,6	3,8	18,4	II
EMA Getadar	0,4	0,7	0,0	7,2	16,7	25	II
EMA Ilundain	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	Sin datos	0	I
EMA Larrabide	3,4	3,6	0,0	13,0	8,2	28,2	III
EMA Noain	2,0	0,2	0,0	Sin datos	Sin datos	2,2	I
EMA Oskotz	3,2	5,6	3,6	17,1	13,0	42,5	III
EMA Ronvesvalles	0,9	1,2	0,0	12,0	Sin datos	14,1	II
EMM Belate	5,4	2,0	0,0	9,8	8,7	25,9	II
EMM Belzunce	6,2	0,0	0,0	18,0	21,0	45,2	III
EMM Erro	2,7	0,0	0,0	15,9	20,4	39	III
EMM Eugui	4,8	0,0	0,0	14,2	18,8	37,8	III
EMM Iraizotz	17,5	0,0	0,0	15,1	13,4	46	III
EMM Irotz	9,0	0,0	0,0	18,0	24,0	51	III
EMM Monreal	0,4	0,0	1,0	12,4	18,8	32,6	III
EMM Olague	8,0	10,0	0,0	0,5	33,0	51,5	III
EMM Zalba	0,7	0,0	0,0	15,1	19,1	34,9	III
EMM Zuazu	1,4	0,0	0,0	10,6	23,5	35,5	III
EMM Zubiri	5,5	0	0	14,5	33,2	53,2	III

Tabla IV.18.- Valores de *CHA* para el evento de 2010.

En función de las citadas Fórmulas IV.1 y IV.2 se presentan los nuevos valores de *CN* en función de las condiciones de humedad antecedente.

SUBCUENCA	CN Medio	CN 2006	CN 2007	CN 2009 Ene	CN 2009 Feb	CN 2010
R10W10	69	84	74	84	84	84
R20W20	69	84	69	84	84	80
R30W30	85	93	86	93	93	88
R40W40	85	93	93	93	93	85
R50W50	85	93	90	93	93	88
R60W60	62	79	79	79	79	74
R170W70	65	81	81	81	81	81
R120W80	64	81	81	81	81	74
R150W90	66	82	82	82	82	82
R410W100	62	79	78	79	79	79
R440W120	80	90	79	90	90	71
R310W130	81	89	71	91	89	70
R340W140	78	84	78	89	89	75
R290W150	76	86	74	88	86	74
R370W160	73	74	85	86	86	83
R350W170	70	70	84	84	84	79
R390W180	61	78	78	78	78	76
R420W190	81	91	81	91	91	69

Tabla IV.19.- Los valores de *CN* utilizando todas las estaciones meteorológicas y para todos los eventos en función de la *CHA*

ANEXO V

Resultados.

V.1. Introducción.

En un primer momento, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos a partir de realizar dos simulaciones, ambas con mismos parámetros a excepción de la división areal de cuenca en función de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Para la primera simulación (Caso 1), se realizó la simulación teniendo en cuenta únicamente las EMAs existentes en la cuenca o en sus proximidades, mientras que para la segunda simulación (Caso 2), se tuvieron en consideración tanto las EMAs como las EMMs.

En los resultados obtenidos para el “*Punto de Salida*” situado en Arazuri (Figura 36), se puede observar, a excepción del evento de 2007, en donde las diferencias apenas son significativas entre ambas simulaciones, en el resto de los cuatro eventos, las simulaciones realizadas con sólo las EMAs se alejan más de lo que es la realidad (Observado) que las simulaciones en donde se ha utilizado todas las estaciones meteorológicas posibles, es decir, tanto EMAs como EMMs. En algunos casos es por defecto, como se aprecia claramente en los eventos de 2009 Febrero o evento de 2010, y otras es por exceso, como se observa en el evento de 2009 Enero o en el evento de 2006.

En vista de que la utilización únicamente de las EMAs, suponía una pérdida de información, partir de este momento, las simulaciones posteriores se realizarán utilizando los datos de todas las estaciones meteorológicas posibles.

De este modo se volvieron a realizar otras nuevas simulaciones para cada evento, esta vez, teniendo en cuenta la subcuenca asociada al embalse de Eugui, o suponiendo que dicha subcuenca no tiene aportación alguna, es decir, la aportación desde el pantano es nula, considerando en ese caso que el caudal que vierte dicha infraestructura es un como un flujo base y que lo único que hace dicho caudal aportado es propagarse a lo largo de la cuenca.

Los resultados obtenidos completos se muestran en el apartado siguiente de este anexo (Apartado V.2). Pero a la vista de los mismos, se puede afirmar que en todos los eventos estudiados, la aportación del embalse de Eugui es un flujo base para el resto de las mediciones en las estaciones de aforo, es decir, un flujo que se transmite a lo largo de la cuenca sin mayor trámite, salvo la excepción del evento de 2009 Febrero.

Finalmente, una vez valoradas las diversas opciones y variables en el estudio de la cuenca, y aplicados los ajustes citados los apartados 4.7. “Aplicación y análisis del modelo” y 4.2 “Análisis de la correspondencia entre datos” de la Memoria, se han realizado los gráficos definitivos y los cuales se muestran en el apartado V.3 de este Anexo acompañados con los mapas de precipitación.

V.2. Resultados; *Con Eugui* versus *Sin Eugui*.

Avenida de marzo 2006.

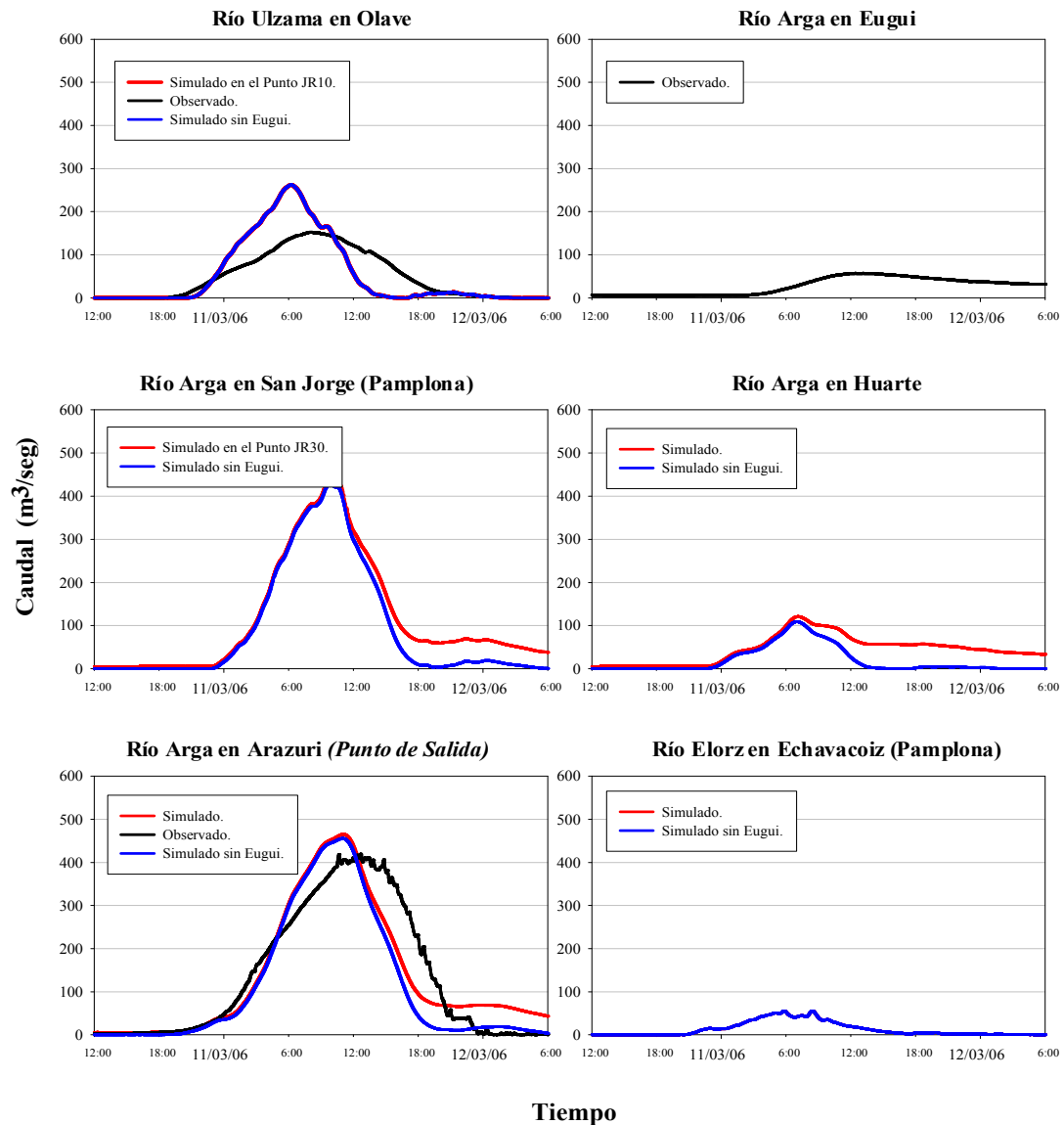


Figura V.1.- Resultados *Con Eugui* vs *Sin Eugui*: Evento de 2006.

Avenida de abril 2007.

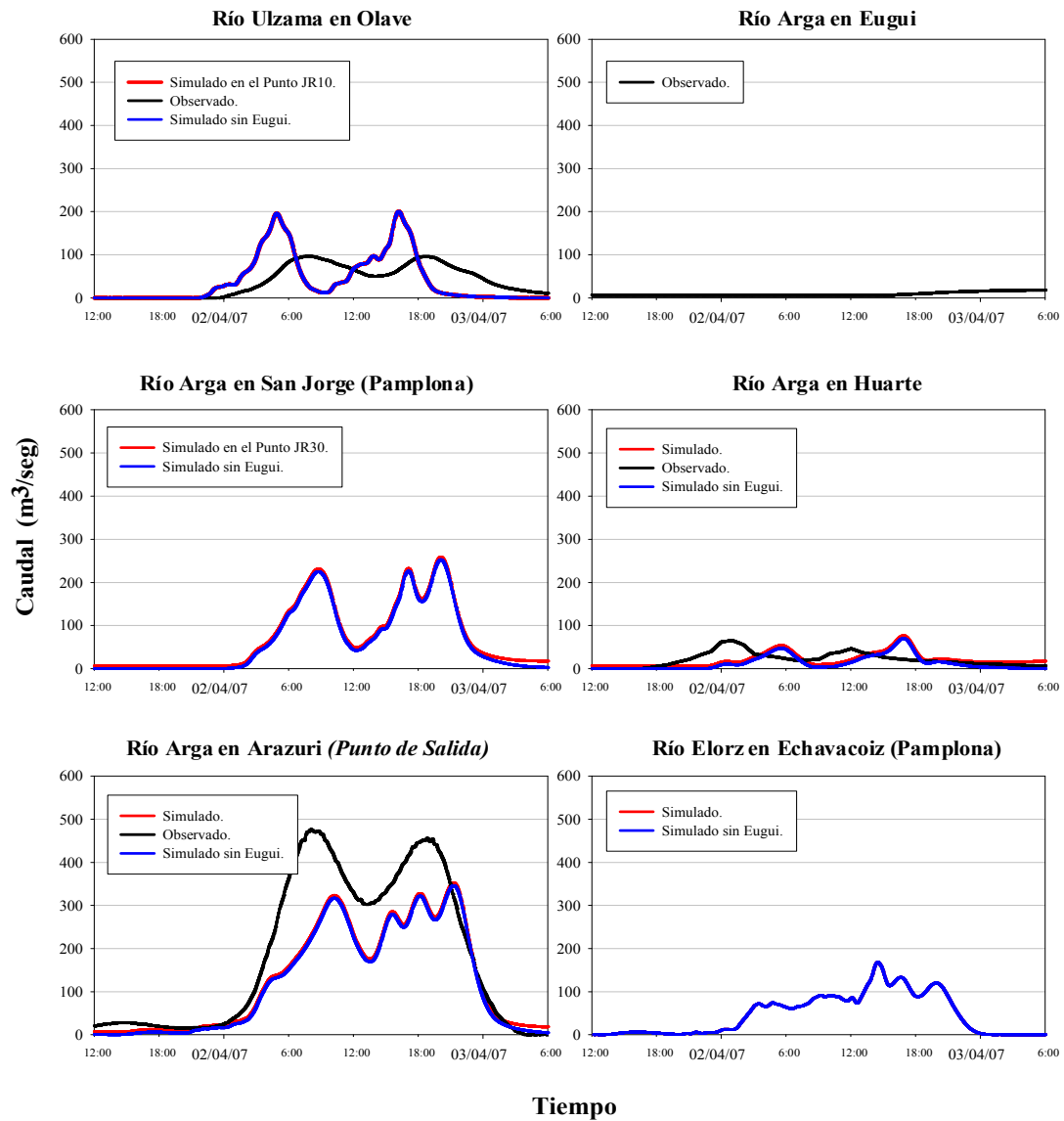


Figura V.2.- Resultados *Con Eugui* vs *Sin Eugui*: Evento de 2007.

Avenida de enero 2009.

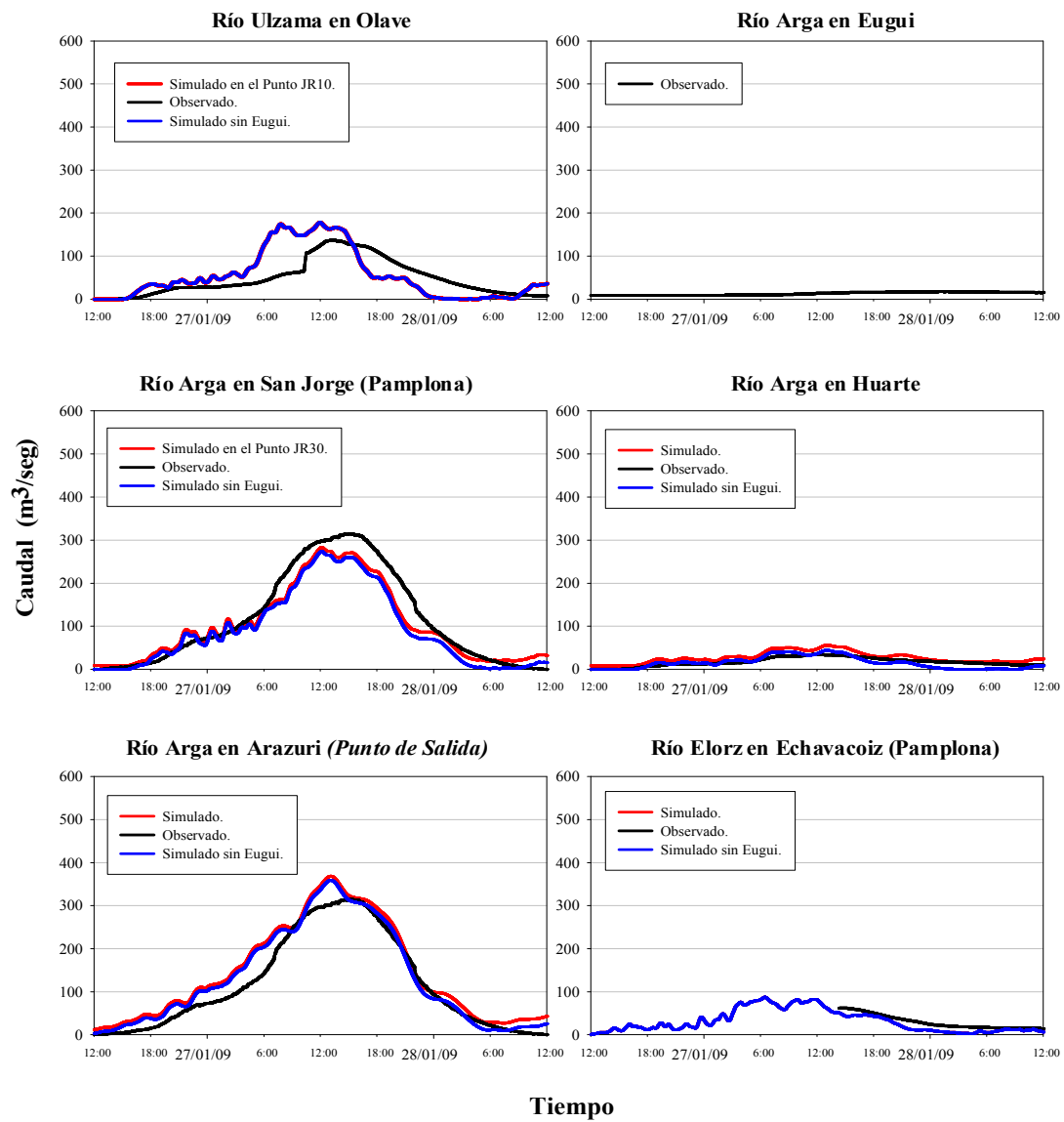


Figura V.3.- Resultados *Con Eugui* vs *Sin Eugui*: Evento de enero 2009.

Avenida de febrero 2009.

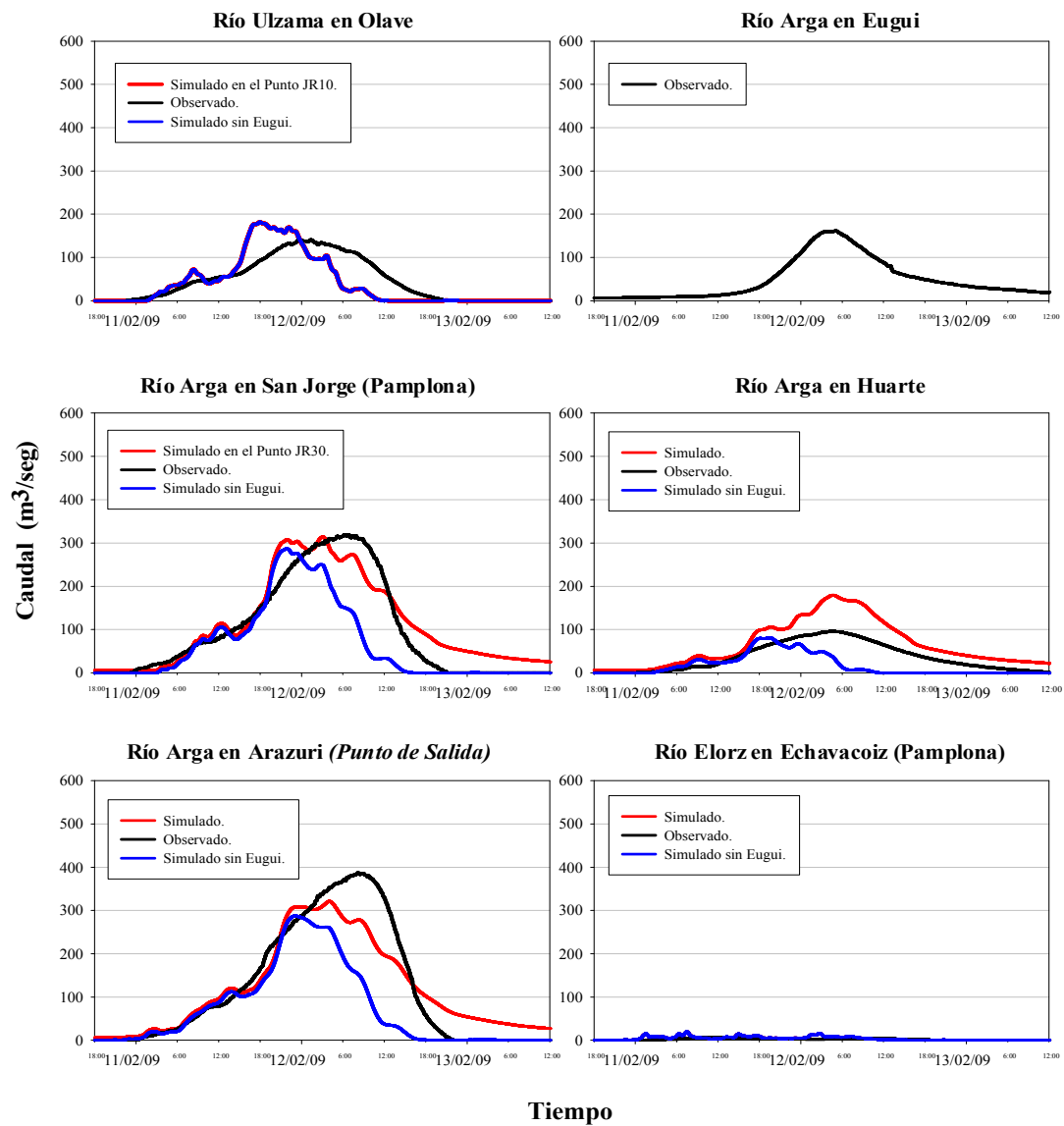


Figura V.4.- Resultados *Con Eugui* vs *Sin Eugui*: Evento de febrero 2009.

Avenida de enero 2010.

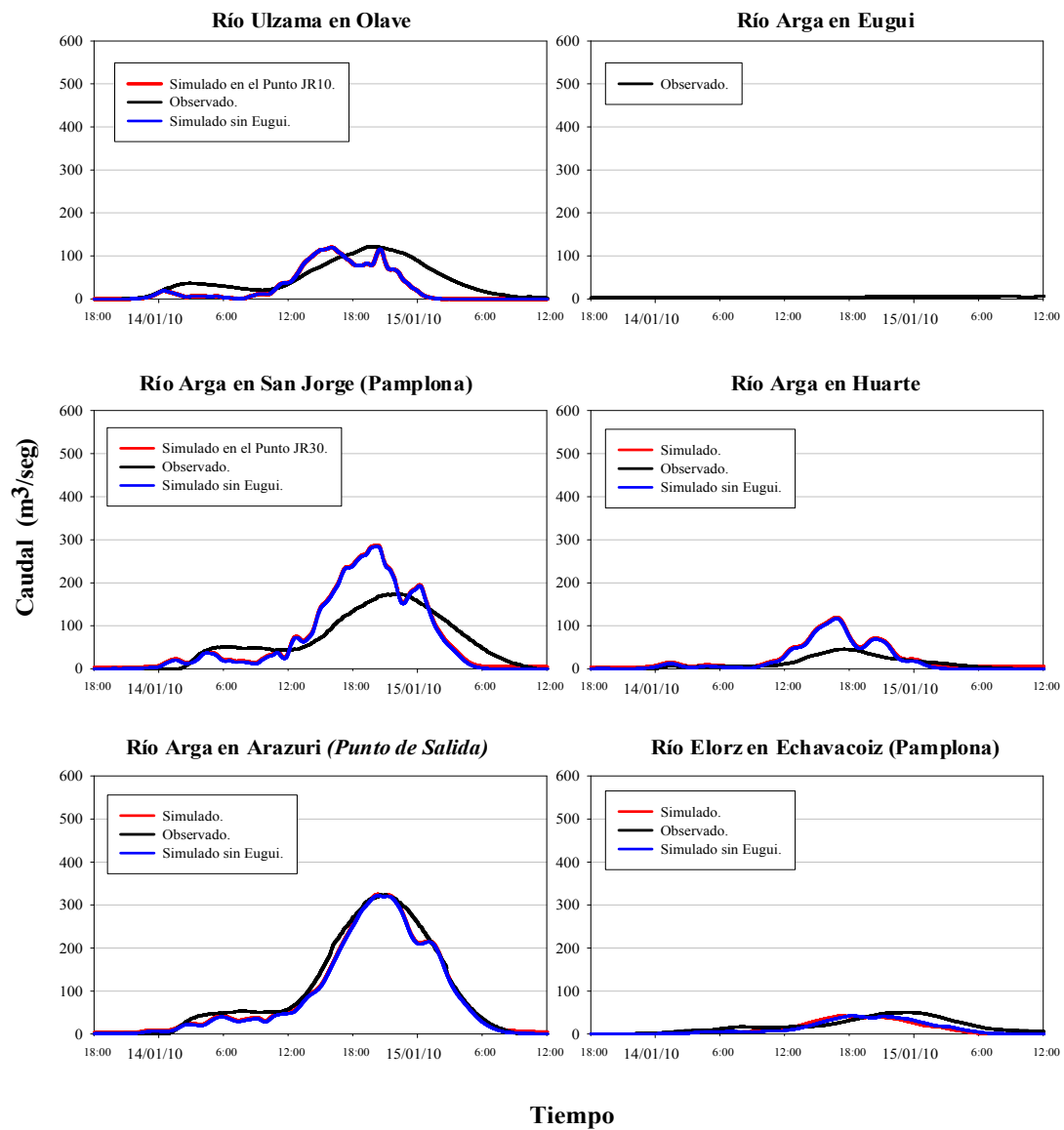


Figura V.5.- Resultados *Con Eugui* vs *Sin Eugui*: Evento de 2010.

IV.3. Resultados definitivos.

Avenida de marzo 2006.

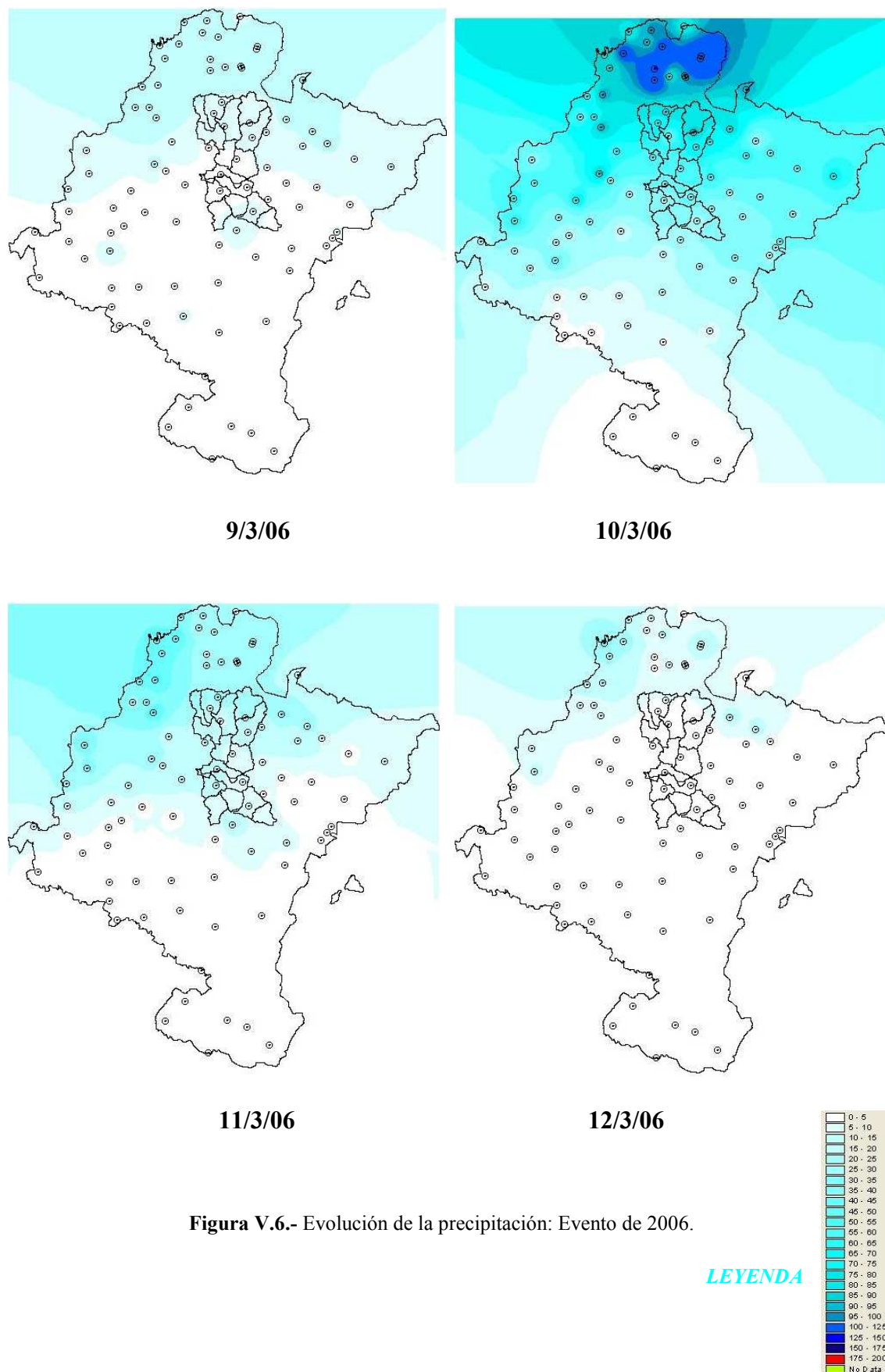


Figura V.6.- Evolución de la precipitación: Evento de 2006.

Avenida de marzo 2006.

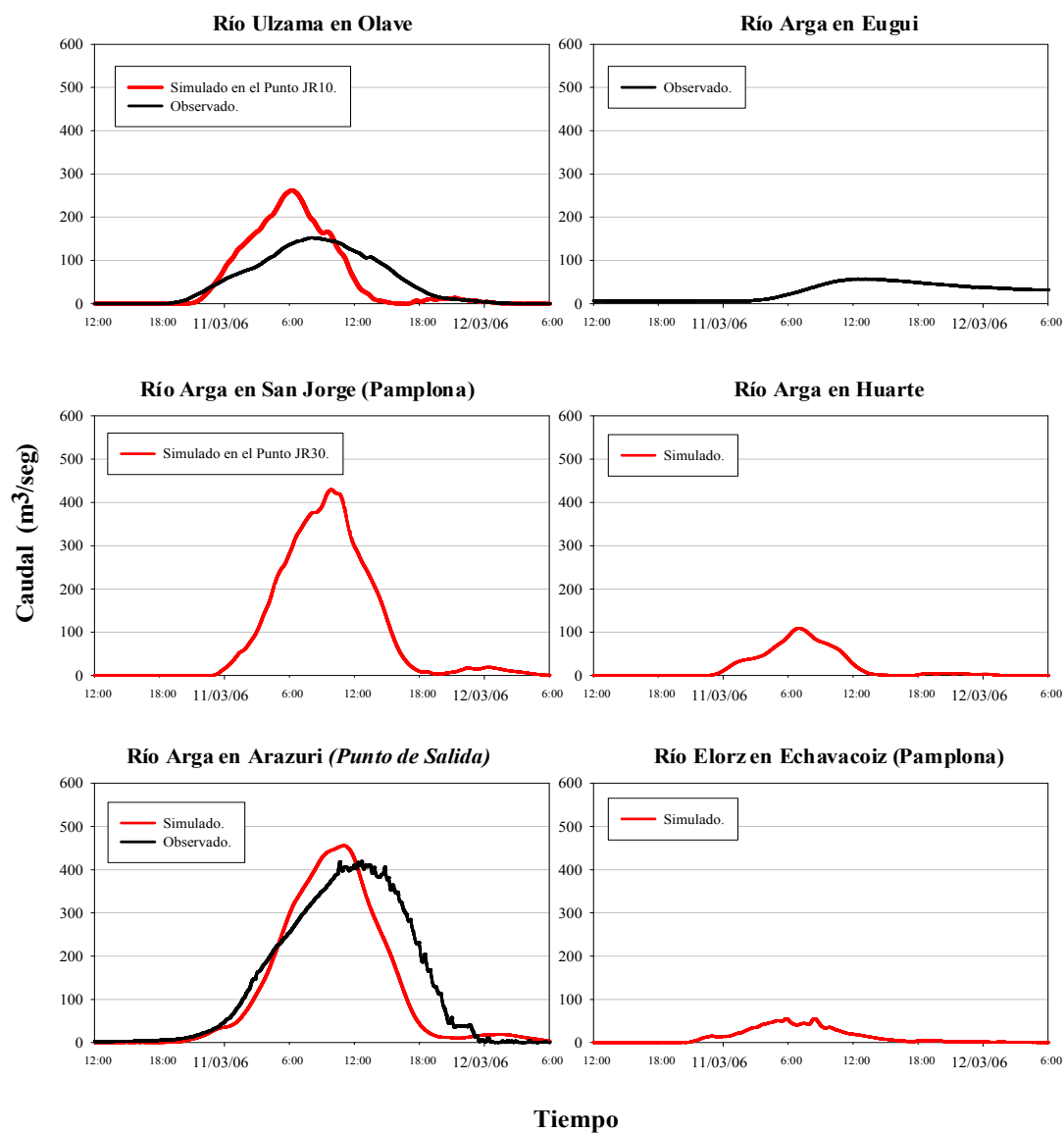


Figura V.7.- Resultados definitivos: Evento de 2006.

Avenida de abril 2007.

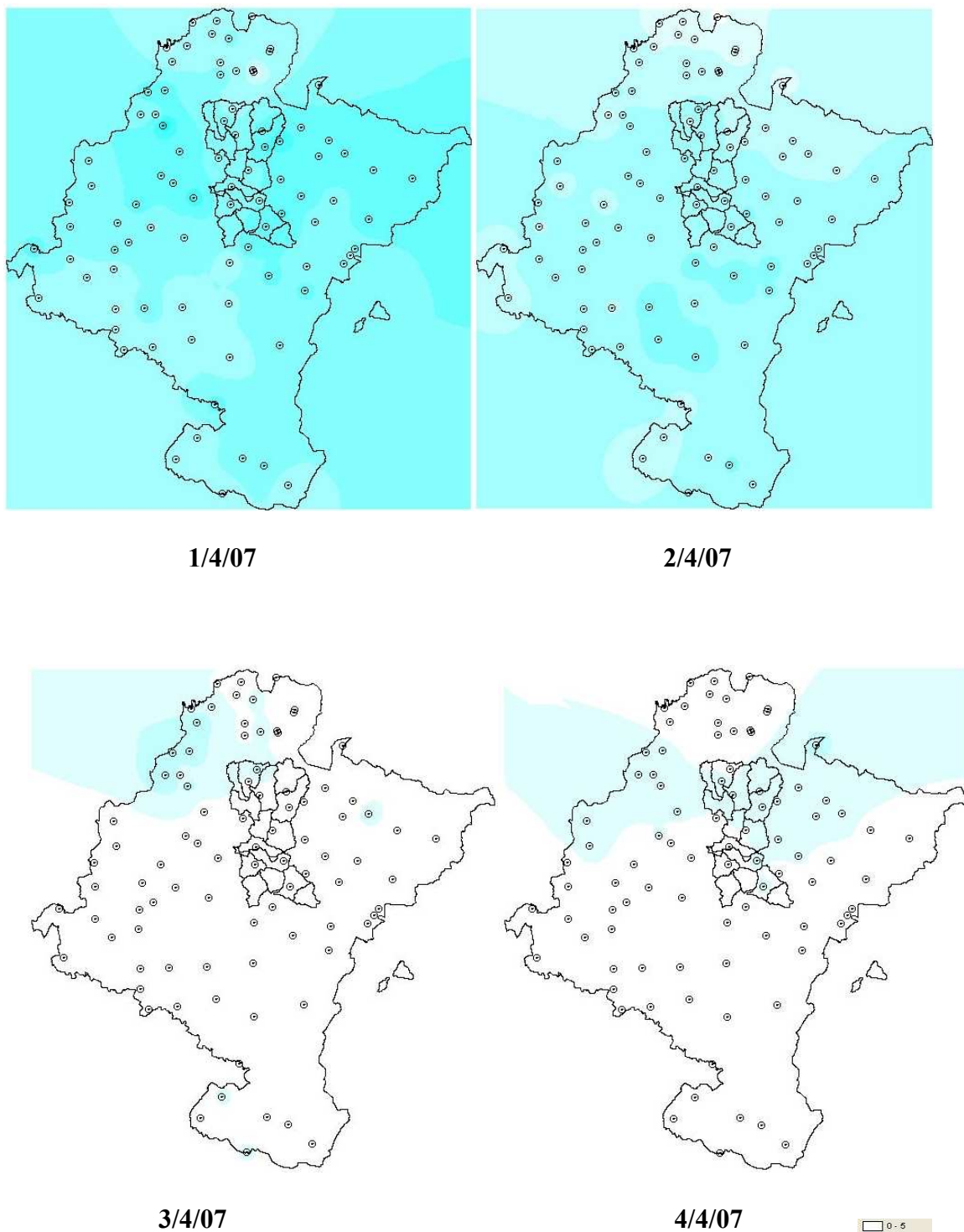
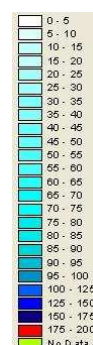


Figura V.8.- Evolución de la precipitación: Evento de 2007.

LEYENDA



Avenida de abril 2007.

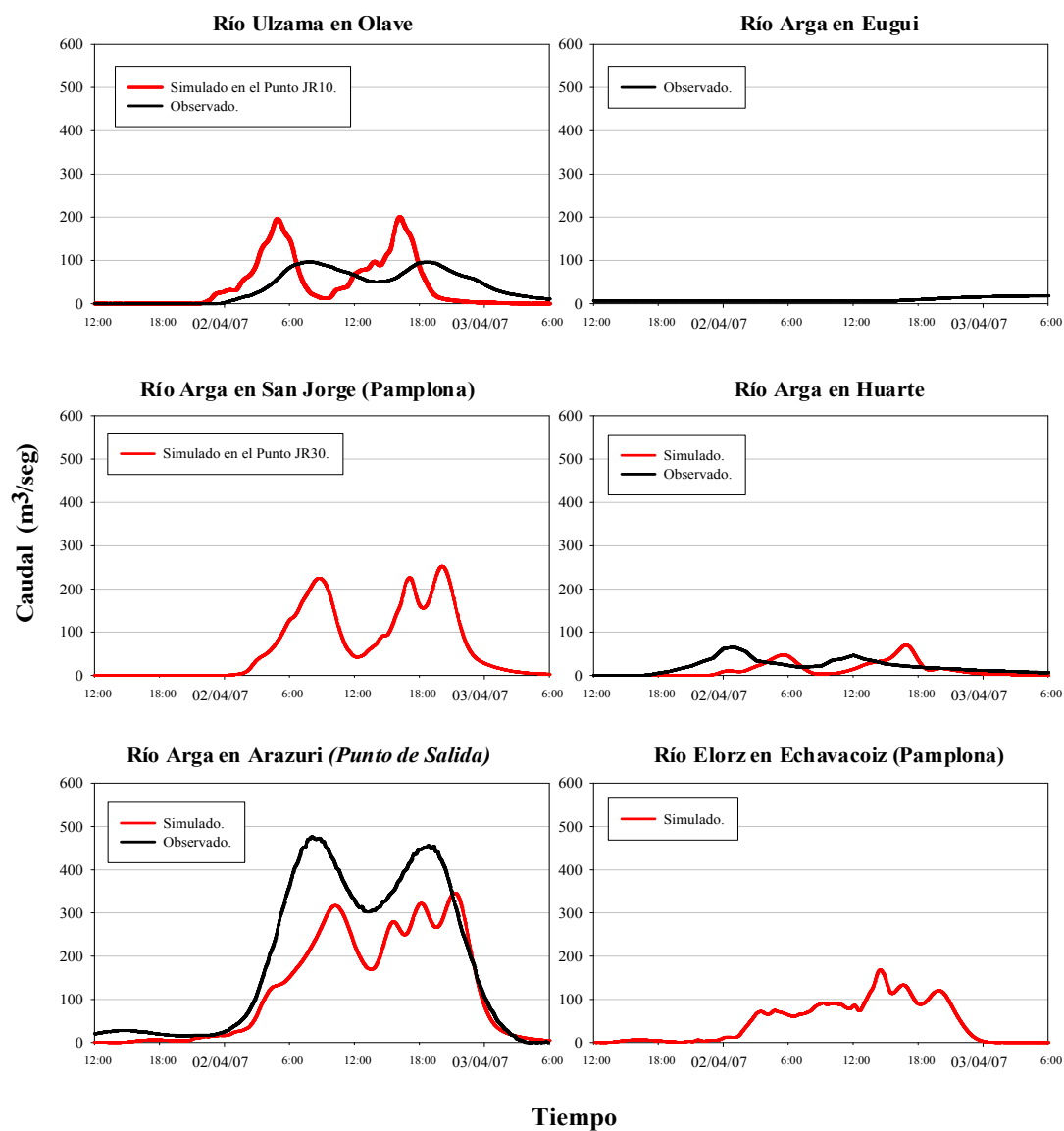


Figura V.9.- Resultados definitivos: Evento de 2007.

Avenida de enero 2009.

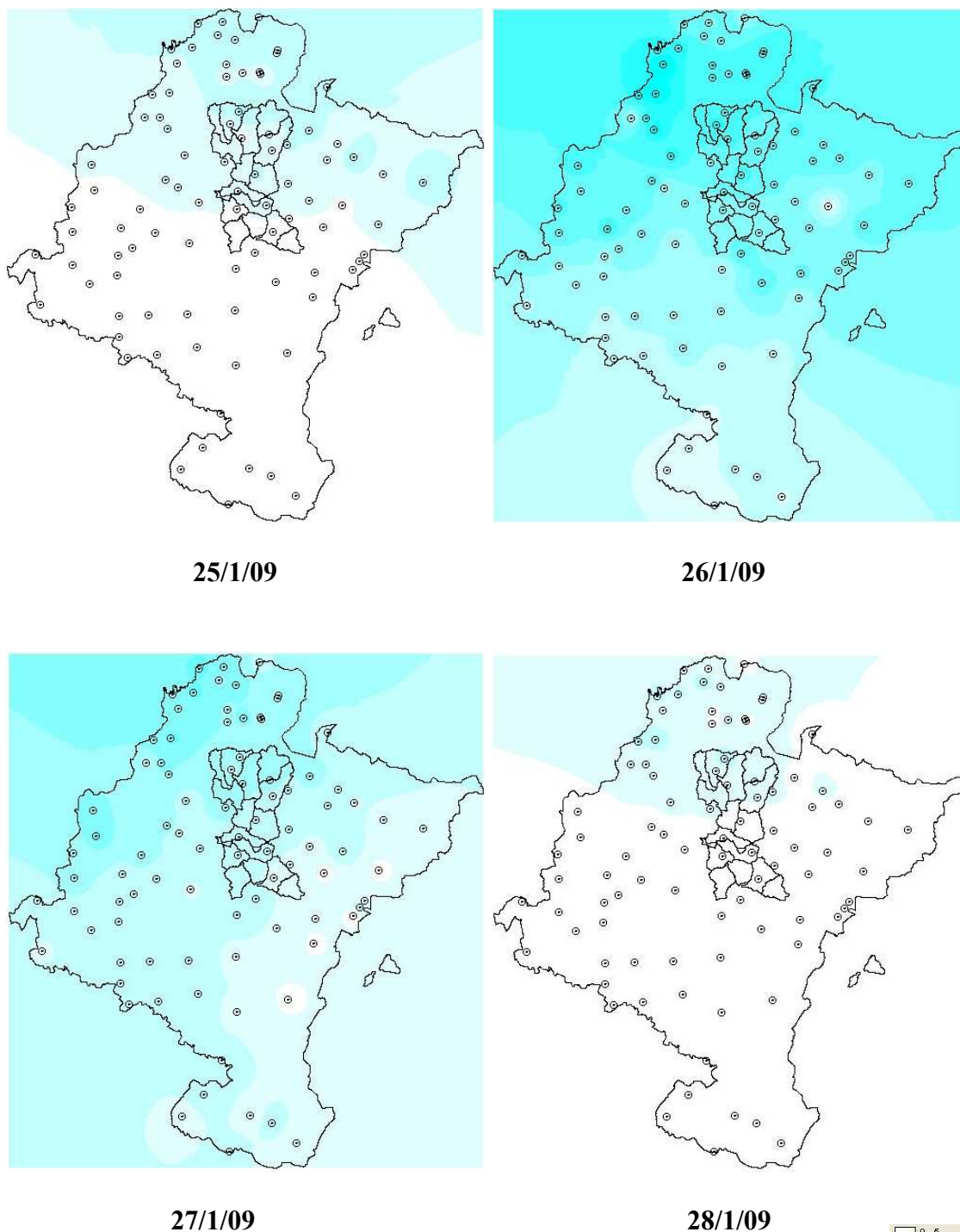
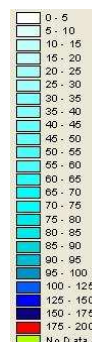


Figura V.10.- Evolución de la precipitación: Evento de enero de 2009.

LEYENDA



Avenida de enero 2009.

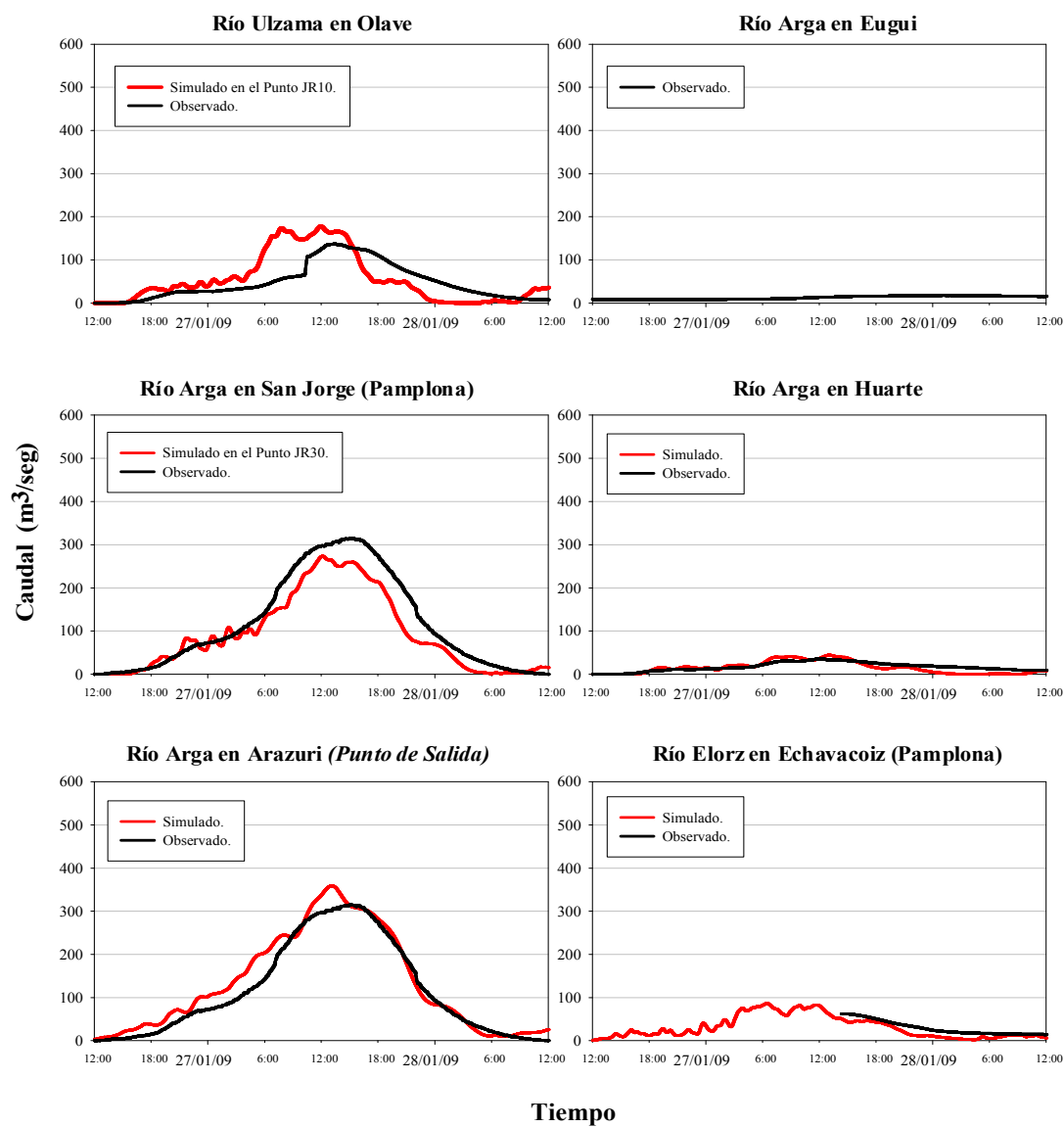


Figura V.11.- Resultados definitivos: Evento enero de 2009.

Avenida de febrero 2009

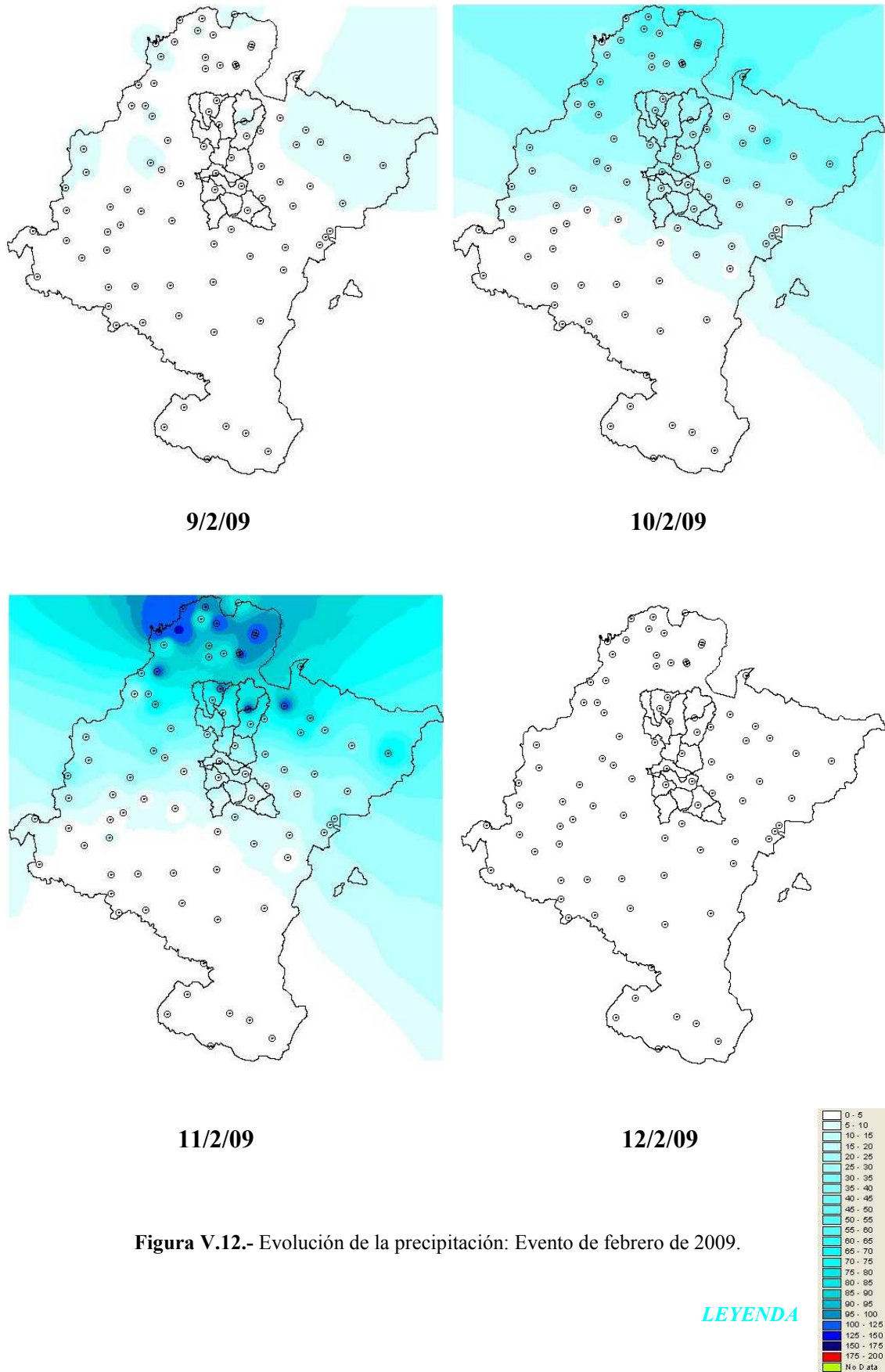


Figura V.12.- Evolución de la precipitación: Evento de febrero de 2009.

LEYENDA

Avenida de febrero 2009

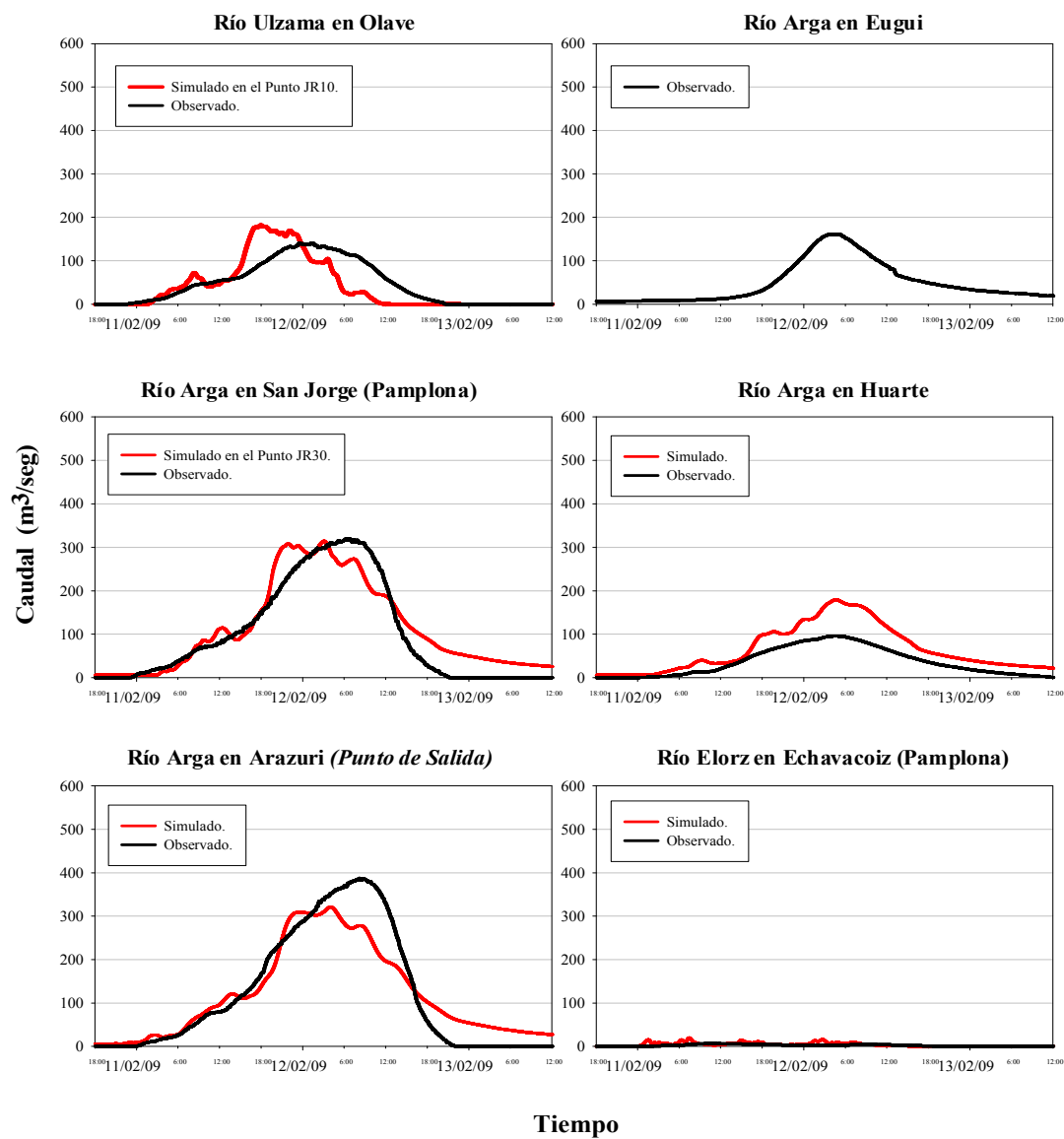
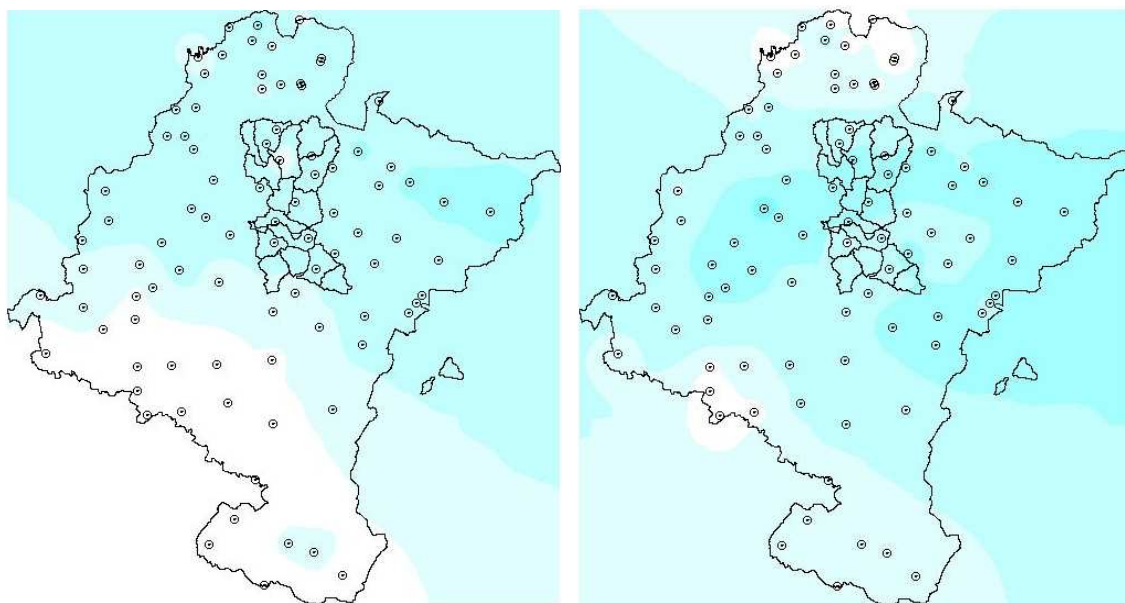


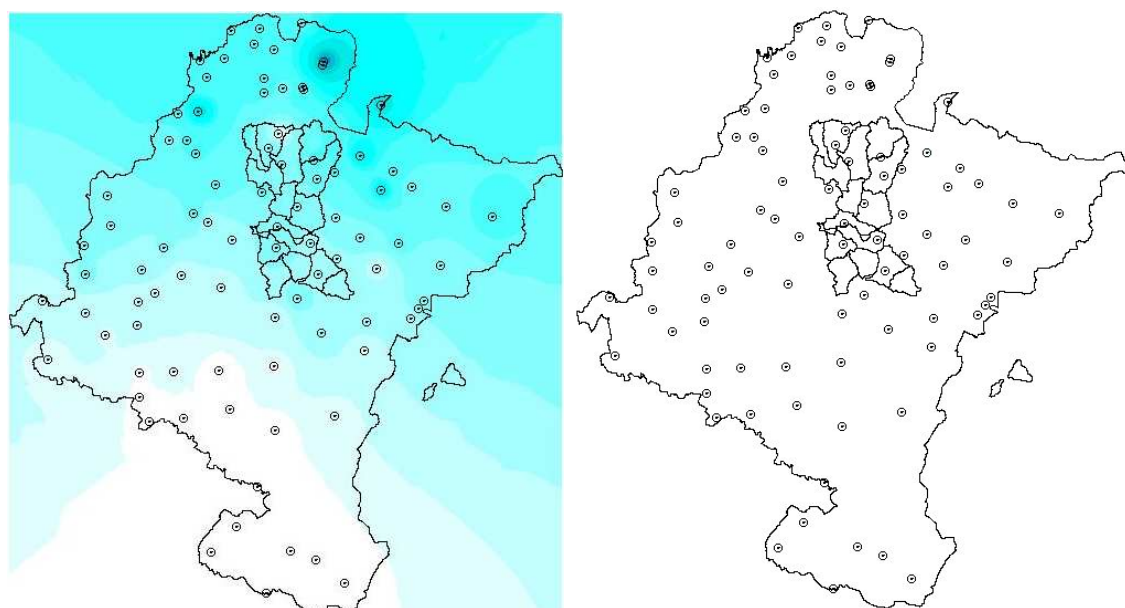
Figura IV.13.- Resultados definitivos: Evento de febrero de 2009.

Avenida de enero 2010.



12/1/10

13/1/10

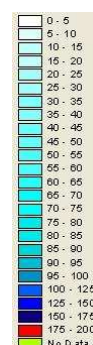


14/1/10

15/1/10

Figura V.14.- Evolución de la precipitación: Evento de 2010.

LEYENDA



Avenida de enero 2010.

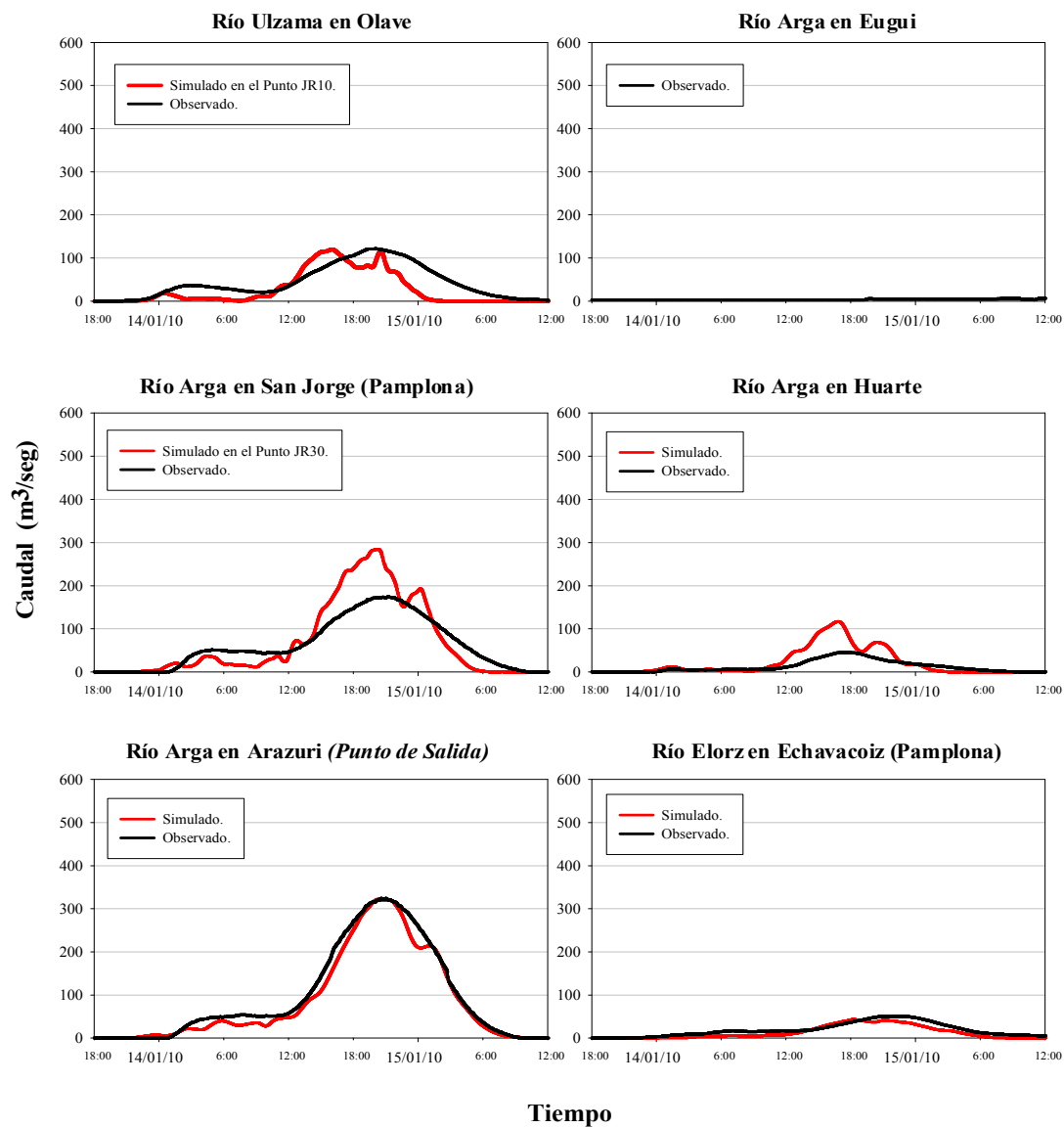


Figura IV.15.- Resultados definitivos: Evento de 2010.
